第 51 卷 第 6 期：2872-2882 高电压技术 Vol.51, No.6: 2872-2882
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250245

等离子体冷链消杀技术研究进展

陈 旻[1]，张靖垚[2]，张基珅[1]，王子丰[1]，张 浩[1]，郭 莉[1]，刘定新[1]，刘 昌[3]，荣命哲[1]

（1. 西安交通大学等离子体生物医学研究中心，西安 710049；2. 西安交通大学第一附属医院外科重症医学科，西安 710061；3. 西安交通大学第二附属医院肝胆胰与肝移植外科，西安 710004）

摘 要：冷链运输是病原微生物长距离跨境传播的重要途径之一。传统的高温消杀技术不适用于冷链环境，而非热消杀技术如紫外线、超声波、化学试剂等存在效率低、冷链环境适应性弱、杀菌广谱性差和有害物残留等局限，难以完全满足应用需求，因此迫切需要开发安全高效的新型冷链消杀技术保障人民生命健康。近年来，等离子体在冷链消杀领域展现出广阔的应用前景。研究表明，等离子体产生的活性粒子可以大范围弥散作用到密闭冷链空间的各个部位，进而广谱、高效、安全、稳定杀灭多种病原微生物。该文从面向冷链消杀的等离子体放电类型与应用形式、等离子体冷链消杀效应、等离子体冷链消杀机制 3 个方面总结了等离子体冷链消杀技术的研究现状，分析了该技术当前面临的科学和技术问题并展望了未来的发展方向，旨在为相关理论与应用研究提供参考。

关键词：等离子体；冷链；消毒灭菌；等离子体活化气；活性粒子

Research Progress of Plasma Cold-chain Disinfection and Sterilization Technology

CHEN Min[1], ZHANG Jingyao[2], ZHANG Jishen[1], WANG Zifeng[1], ZHANG Hao[1], GUO Li[1], LIU Dingxin[1], LIU Chang[3], RONG Mingzhe[1]

(1. Centre for Plasma Biomedicine, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of SICU, The First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; 3. Department of Hepatobiliary Surgery and Liver Transplantation, The Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, China)

Abstract：Cold-chain transportation is one of the key pathways for long-distance cross-border transmission of pathogenic microorganisms. Traditional high-temperature disinfection techniques are unsuitable for cold-chain environments. Non-thermal disinfection technologies such as ultraviolet irradiation, ultrasound, and chemical reagents suffer from low efficiency, limited adaptability, narrow antimicrobial spectra, and residual harmful substances, making it difficult to fully meet application requirements. Therefore, there is an urgent need to develop novel, safe, and efficient cold-chain disinfection technologies to protect public health. In recent years, plasma has shown broad application prospects in the field of cold-chain disinfection. Numerous studies have shown that the reactive species generated by plasma can diffuse widely throughout enclosed cold-chain spaces, providing broad-spectrum, highly efficient, safe, and stable inactivation of various pathogens. This paper summarizes the current research status of plasma cold-chain disinfection technology from three aspects, namely, plasma discharge types and application forms for cold-chain disinfection, plasma disinfection effects, and plasma disinfection mechanisms. This paper further analyzes current scientific and technical challenges and envisions future development directions, with the goal of offering valuable references for advancing related theoretical and applied research.

Key words：plasma; cold-chain; disinfection and sterilization; plasma-activated gas; reactive species

0 引言

冷链是指产品生产、加工、储存、运输和销售过程中，通过一系列控制措施使产品始终处于规定的低温环境内，以保持质量的一种供应链管理系统。根据产品需求，冷链的低温环境可以分为冷藏(0~25 ℃)和冷冻(<0 ℃) 2 个温区。冷链在全球物流中扮演着关键角色，但同时也是细菌、病毒等病原微生物跨区域传播的主要途径之一，这是由于：一方面，冷链运输货物种类以食品为主，容易携带病原微生物；另一方面，低温环境使得这些病原微生

基金资助项目：陕西省科技厅两链融合项目(2021LL-JB-06(2.1))；国家自然科学基金 (52307257)。
Project supported by Science and Technology's Two Chain Integration Project of Shaanxi Provincial Department (2021LL-JB-06(2.1)), National Natural Science Foundation of China (52307257).

物在冷链中存活期较长，导致冷链食品及外包装很容易成为病原微生物跨区域传播的载体[1-5]。一项典型案例是冷链运输引发的新冠肺炎疫情扩散[6-10]。庞星火等人的研究表明，2020 年 6 月发生在北京新发地市场的 COVID-19 疫情反弹很可能是由冷链物流跨境运输的受污染进口食品引发的[8]。然而，传统的高温消杀技术(温度通常>100 ℃)不适用于冷链环境。紫外线、超声波、化学试剂等主流非热消杀技术也存在诸多局限，难以满足实际应用需求。例如，紫外线穿透冰层的消杀效率低，照射 40 min 对冰层下方大肠杆菌的杀灭率低于 99%[11]，且易被货物遮挡形成消杀死角；超声消杀技术仅适用于液体或液体中物品的消杀，因而对冷冻温区的适应性差；化学试剂的杀菌广谱性差，且在使用后易残留。因此，迫切需要开发一种新型安全高效的冷链消杀技术以保护人民生命健康。

21 世纪以来，等离子体技术在消毒灭菌领域的应用日益广泛[12-15]。大量研究发现，等离子体技术具有广谱消毒灭菌能力，对多种病原微生物都具有明显的消杀效果[15-19]。等离子体能够产生种类丰富的活性氧粒子(reactive oxygen species，ROS)和活性氮粒子(reactive nitrogen species，RNS)[20-23]。这些活性粒子可以通过引起病原微生物细胞膜结构破坏、膜蛋白和脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid，DNA)分子损伤、氧化应激等方式诱导病原微生物死亡[24-27]。与现有非热消杀技术相比，等离子体冷链消杀技术具有以下优势：1）广谱高效，等离子体能够对新冠病毒、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等多种致病微生物进行高效消杀[28-32]；2）冷链环境适应性好，等离子体产生的活性粒子借助气体的弥散性，可以在大体积空间内对堆叠货物实现均匀化、无死角的处理效果；3）无有害物残留。等离子体产生的 OH、O_2^-等短寿命活性粒子存在时间一般不超过 10^{-6} s[33-34]，而 O_3、H_2O_2、HNO_2 等长寿命活性粒子也会自然降解，不会残留。因此，等离子体作为一种新型冷链消杀技术，具有广阔的应用前景。

尽管如此，等离子体冷链消杀技术应用发展也面临新的问题，一是病原微生物在低温环境下处于休眠等状态，能否有效消杀；二是低温环境下活性粒子是否能够有效产生并实现大范围扩散作用；三是病原微生物可能隐藏在一定厚度的冰层中，活性粒子能否渗透作用。因此，如何从技术层面实现活性粒子的高效产生、大范围扩散和有效渗透，如何从科学层面阐释活性粒子在低温环境中的杀菌机制，是等离子体冷链消杀技术发展面临的关键挑战。鉴于此，本文首先从等离子体产生与应用形式两个方面，总结了面向冷链消杀的等离子体技术，进而以活性粒子为主线，归纳分析了等离子体的冷链消杀效应以及内在机制，最后列举了现有研究存在的科学与技术问题，并对该技术的未来发展进行展望。

1　面向冷链消杀的等离子体放电类型与应用形式

等离子体的冷链消杀效果取决于活性粒子在冰层中的浓度与渗透深度。为了实现理想的冷链消杀效果，等离子体产生的活性粒子必须浓度高、溶解性好且消杀活性强，同时可以在冷链大空间中高效传递至被处理物表面。本章将从等离子体的应用形式与放电类型两个方面介绍适用于冷链消杀的等离子体技术，最后介绍一种基于空气放电模式协同的等离子体活化气技术。

1.1　等离子体的放电类型

在冷链消杀研究中，研究人员所采用的等离子体放电类型主要包括射流放电、介质阻挡放电(dielectric barrier discharge，DBD)和滑动弧放电。

射流放电是指通过电场和气流场的双重作用在开放空间产生等离子体的放电形式。等离子体射流可以将放电产生的活性粒子直接输送至被处理对象表面，效率较高[35]。射流放电装置的典型结构主要为针环结构和环环结构 2 种[36]，如图 1(a)、(b)所示。在实际应用中，射流放电通常采用 He、Ar 等稀有气体作为工作气体以实现低温、稳定的放电状态，这一方面导致装置体积较大、应用成本较高；另一方面导致产生的活性粒子以短寿命活性粒子为主，难以实现大范围扩散作用。

介质阻挡放电是一种通过在高压电极和地电极之间插入至少 1 个介质板限制放电电流从而产生冷等离子体的放电形式[37]。DBD 的典型结构通常是平行平板结构或同轴筒式结构，如图 1(c)、(d)所示。DBD 采用环境空气作为工作气体就能实现低温、稳定的放电状态，用于冷链环境消杀具有操作简单、成本低廉等优势；但其较低的放电能量密度限制了活性粒子产生浓度，往往需要较长处理时间才能实现理想消杀效果。

滑动弧放电是一种瞬时的电弧放电，通过气流场驱动高压电极间电弧向下游进行周期性“滑动-

拉长-熄灭”[38-39]。滑动弧放电的典型结构如图 1(e)所示，主要结构包括 2 个刀片电极以及带进出气口的介质外壳(通常采用石英玻璃)。滑动弧放电采用空气作为工作气体，能量密度较高且化学反应选择性较好，可以产生高浓度的活性粒子[38]。但其放电区域温度较高，可达 300~6 000 K，因此其用于冷链消杀时一般不与被处理对象发生直接接触，即通过放电活化空气等气体介质，使活性成分经气流传质作用于被处理对象，在确保消杀效果的同时避免热效应损伤。

1.2 等离子体的应用形式

根据等离子体是否与被处理对象直接接触，等离子体冷链消杀的应用形式可分为直接处理和间接处理 2 种[38]，如图 2 所示。对于直接处理，等离子体产生的短寿命与长寿命活性粒子均可输送至被处理物表面，具有生物活性强、输送效率高的优势[40-44]，常用的放电类型以射流为主。然而，这种应用形式并不十分适合冷链消杀。这是由于等离子体的尖端放电特性会导致处理不均匀，不易长期稳定，容易损伤食品、货物外包装等；同向电流引起的自收缩特性会导致处理面积小，单次处理规模受限；起主导地位的短寿命活性粒子反应活性强、有效期极短，会导致无法进行更大范围的弥散作用，难以满足复杂冷链环境如大体积冷链运输/储存空间内的空气消杀、覆盖冰层的货物消杀、堆叠物品全表面消杀等需求。

间接处理是指等离子体与被处理对象不直接接触，其产生活性粒子可以通过气体等介质材料，经过加载、存储、释放等环节作用于被处理对象，进而达到消毒灭菌等效果。常用的放电类型以 DBD 和滑动弧放电为主。

对于间接处理，现有研究主要采用等离子体活化处理后的气体介质(简称等离子体活化气)进行冷链消杀应用。由于短寿命气相活性粒子难以扩散并加载到气体介质中，因此等离子体活化气的主要成分为 O_3、NO_2 和 N_2O_5 等长寿命气相活性粒子。这使得等离子体活化气的生物活性弱于等离子体直接处理，但其活性维持时间也显著增加，同时避免了被处理对象对等离子体放电的影响，提高了消杀效果稳定性。此外，等离子体活化气还可以借助气体的扩散、对流等输运特性，实现大面积、均匀化、无死角的处理效果。上述有益特性使得等离子体活化气间接处理成为现有冷链消杀研究中的主要应用

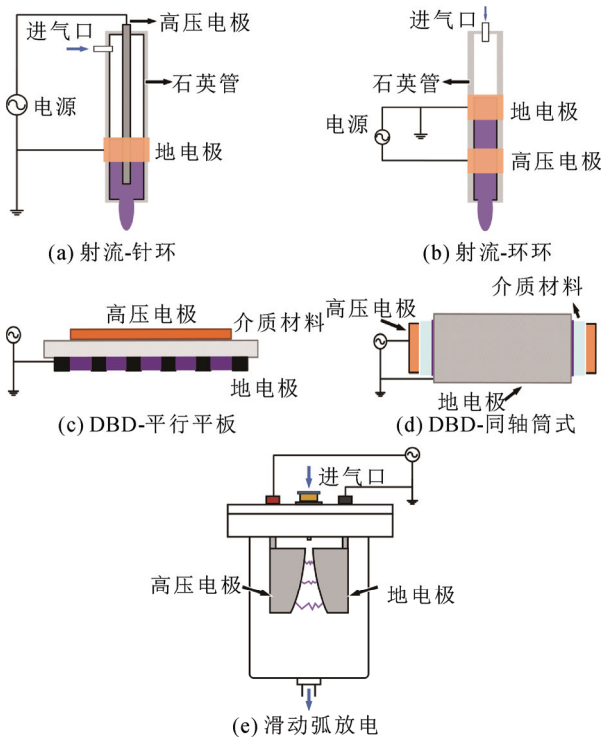


图 1 面向冷链消杀的等离子体放电类型

Fig.1 Plasma discharge types for cold-chain disinfection

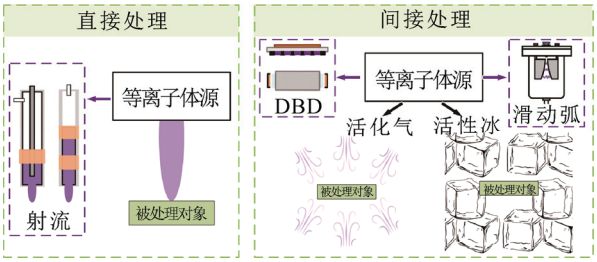


图 2 面向冷链消杀的等离子体应用

Fig.2 Application of plasma in cold-chain disinfection

形式。此外，有些研究人员还尝试将等离子体活化处理的水溶液冷冻成富含活性粒子的冰块，用于冷链食品的消杀和保鲜[45-47]。这种间接处理方式在抑制食品中微生物生长、延长食品保质期和保持食品色泽等方面也取得了良好的应用效果。

1.3 基于空气放电模式协同的等离子体活化气技术

空气放电可以就地取材并经济高效地产生富含大量 ROS 和 RNS 的等离子体活化气，在冷链消杀应用中优势巨大。然而，空气放电存在 3 种产物截然不同的放电模式——“臭氧(O_3)模式”、“氮氧化物(NO_x)模式”和“过渡模式”。其中，O_3 模式产生以 O_3 为主的活性粒子，NO_x 模式产生以 NO_2 为主的活性粒子。这 2 种模式在特定条件下会快速转化，并在转化过程中形成 O_3 与 NO_2 共存的过渡模

式，同时产生 NO_3、N_2O_5 等加载性好、消杀能力强的高价态 NO_x，但是该模式难以稳定控制。本课题组通过混合 2 种不同放电模式产生的等离子体活化气，即：空气放电 O_3 模式等离子体活化气(以下简称 O_3 活化气)和 NO_x 模式等离子体活化气(以下简称 NO_x 活化气)，实现了稳定产生富含高价态 NO_x 的等离子体活化气。本课题组进一步将上述空气放电模式协同等离子体活化气(以下简称模式协同活化气)技术应用于冷链消杀，同时采用气体内循环方式快速增加密闭冷链空间内活性粒子浓度，取得了良好的应用效果，具体细节将在第 2 章中阐述。

2　等离子体在冷链环境下对微生物的消杀效果

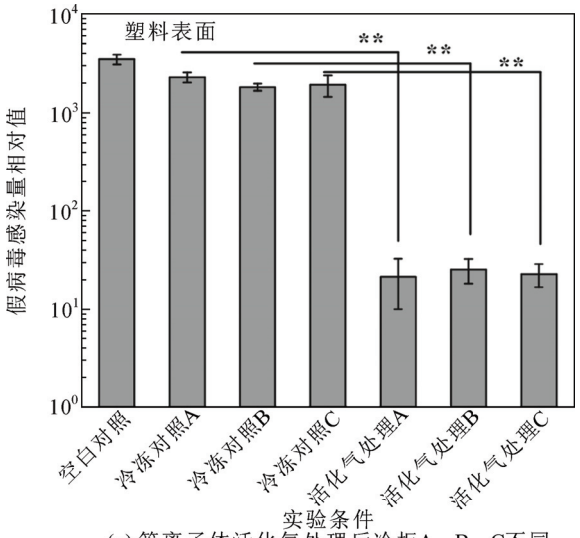
本章将从等离子体直接处理和间接处理两方面，介绍现有研究中等离子体技术用于上述冷链消杀场景时对多种微生物的消杀效果。

2.1　直接处理

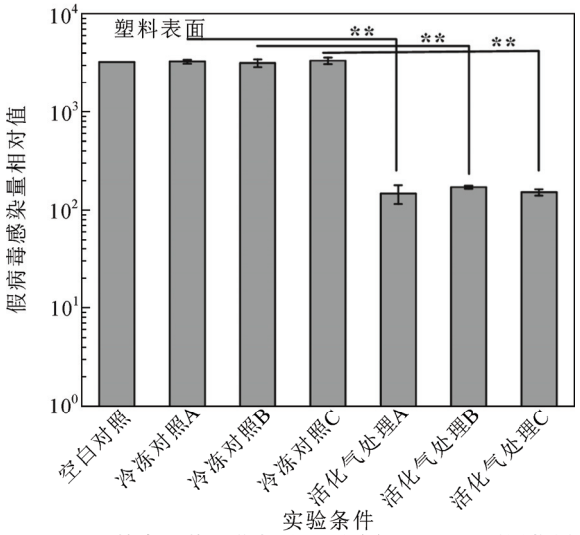
众多研究表明，等离子体直接处理能有效消杀多种材质的包装表面[40,48]以及各类食品如新鲜绿叶蔬菜[41]、肉类[42]、鸡蛋[43]、果汁[44]中的微生物，且在适宜工作条件下不会对被处理食品的品质造成显著影响。例如，Lee 等人研究发现，射流可以高效消杀煮熟鸡胸肉和火腿切片表面的李斯特菌，且处理后肉片在 10 ℃储存 7 d 仍无存活菌检出[42]。Baier 等人采用射流直接处理玉米沙拉新鲜叶片，将处理后的叶片置于 4 ℃冷藏 72 h，并监测期间叶片的最大光化学效率变化。研究发现在合适的参数下，射流处理可以在避免对绿叶组织产生不利影响的同时有效消杀叶片表面的大肠杆菌[41]。

2.2　间接处理

在冷藏温区中，已经有多项研究表明，等离子体活化气可以对附着在材质表面的多种致病微生物进行有效的消杀。如 Moon 等人采用了 DBD 等离子体活化气处理包装中的草莓(冷藏 4 ℃)[49]，发现等离子体活化气可以有效降低草莓表面真菌含量，从而减缓草莓腐烂速率并不会对其品质产生负面影响。Li 等人采用 DBD 等离子体活化气在–18 ℃下对接种了大肠杆菌的生牛肉块进行了消杀处理，发现消杀处理后，大肠杆菌总数量降低了 30.5%，同时消杀处理不会对牛肉品质造成负面影响[50]。而在冷冻温区中，液态溶液会转变成固态冰，从而在病原微生物表面形成保护层并阻碍活性粒子渗透；同时，冰层中病原微生物也会进入休眠状态，对活性粒子的耐受性显著增强[51-52]。上述变化会显著影响等离子体的冷链消杀效果。例如，本课题组采用了 DBD 等离子体活化气消杀–20 ℃冷柜中塑料薄片表面带有 SARS-CoV-2S 蛋白的假病毒[53]。将洗脱出的假病毒与过表达 hACE2 的 HEK-293T 细胞混合培养后，使用了 ONE-Glo™ 荧光素酶测定系统测定假病毒感染情况，测值越高表明具有感染能力的假病毒越多)。结果如图 3(a)、(b)所示，在经过等离子体活化气处理后，干燥假病毒的感染能力得到有效抑制；但对于塑料薄片上薄冰中的假病毒，等离子体活化气对其感染能力的抑制效果则有较为明显的减弱。Guo 等人也发现 DBD 等离子体活化气对–20 ℃下约



(a) 等离子体活化气处理后冷柜A、B、C不同位置处附着在塑料片上的干燥假病毒感染性



(b) 等离子体活化气处理后冷柜A、B、C不同位置处附着在塑料片上的薄冰中的假病毒感染性

图 3　等离子体活化气对假病毒感染能力的抑制效果

Fig.3　Deactivation effect of plasma-activated gas on pseudovirus

1 mm 冰层中大肠杆菌的杀灭效果并不显著[54]，处理 5 min 后菌落数只降低了约 1.2 lg(CFU·mL^{-1})。

为了进一步提升冷冻温区下等离子体活化气的消杀效果，本课题组提出采用模式协同活化气技术消杀冰层中休眠的病原微生物，并选取了鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*，革兰氏阴性)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*，革兰氏阳性)作为代表性微生物对其应用效果进行研究[55]。如图 4 所示，模式协同活化气可在 10 min 内有效消杀 1 mm 冰中的鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌，其消杀效果明显强于 NO_x 活化气和 O_3 活化气。尽管随温度降低消杀效果有所削弱，但温度低至−80 ℃时，模式协同活化气处理后 1 mm 冰层中金黄色葡萄球菌的菌落数减少量仍可达 4.1 lg(CFU·mL^{-1})，消杀效果依旧显著。

此外，本课题组进一步采用了模式协同活化气对 1.14 m^3 大空间冰柜中不同点位厚达 10 mm 的含菌冰样品进行消杀处理，实现了对大型密闭冰柜中厚冰层内病原微生物的高效消杀[56]。如图 5 所示，模式协同活化气可以高效消杀不同点位处 10 mm 冰层里的金黄色葡萄球菌，杀灭率超过 99.999 9%，且切片检测结果显示对 10 mm 冰层深处细菌的消杀效果保持 99.999 9%，有效消杀深度达 10 mm，效果明显优于传统的 O_3 活化气消杀技术。基于该项技术，本课题组研发了等离子体冷链消杀装置并通过了第三方检测，在–20 ℃下对 4 mm 厚冰层中的金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和 229E ATCC740 冠状病毒的杀灭率均大于 99.999%。

除了采用活化气以外，有研究人员尝试将等离子体活化处理的水溶液冷冻成富含活性粒子的冰块

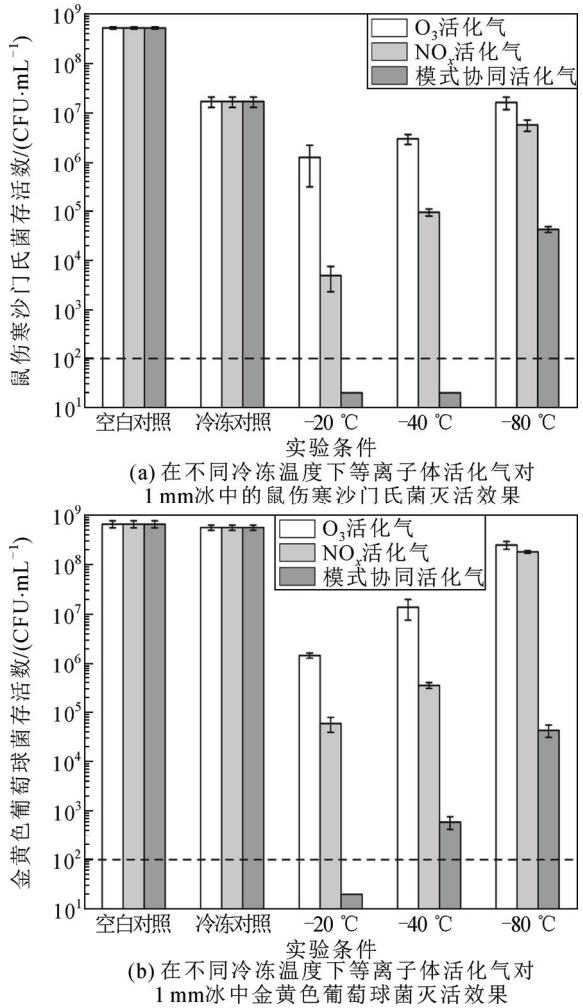


图 4 在不同冷冻温度下等离子体活化气对冰中细菌的消杀效果

Fig.4 Disinfection effect of plasma-activated gas on the bacteria in ice at different freezing temperatures

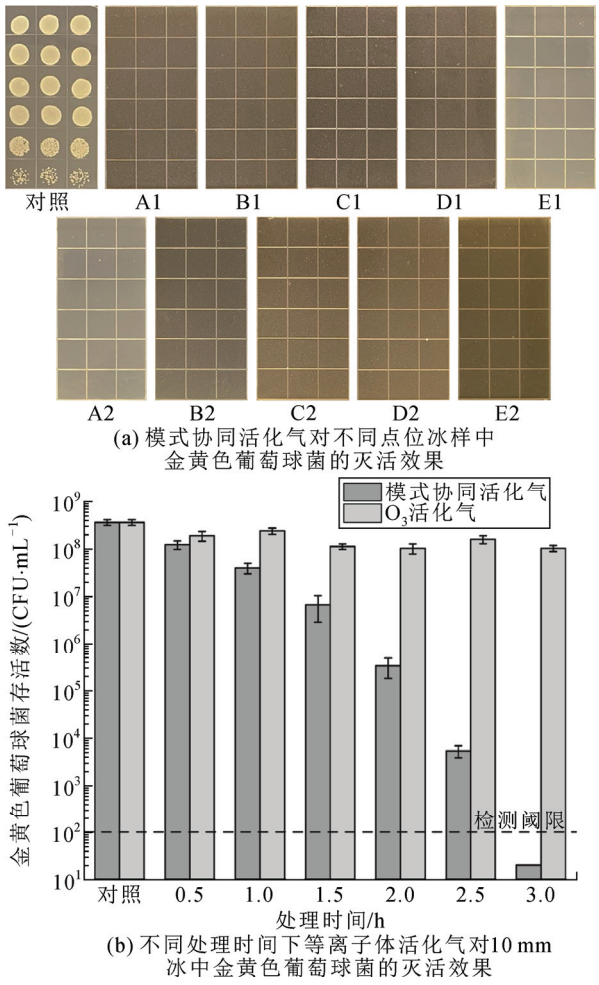


图 5 等离子体活化气对 10 mm 冰样中金黄色葡萄球菌的灭活效果

Fig.5 Sterilization effect of plasma-activated gas on Staphylococcus aureus in 10 mm ice samples

(活性冰)，用于冷链食品的消杀和保鲜。活性冰的低温环境有利于活性粒子的保存，且可以通过冰块与待处理对象的接触缓慢释放活性粒子，起到持续消杀的作用。已有研究探索了将活性冰应用于肉类、海鲜等冷链食品的消杀。例如，Pivovarov 等人将活性冰用于肉类和鱼类的消杀和储存，发现活性冰可以显著减少食品中的微生物污染，从而抑制其产生难闻气味，并且保持其色泽在 30 d 内基本不变，产品保质期提高了 4~5 倍[45]；艾春梅等人研究了活性冰对东方对虾保鲜效果的影响，发现活性冰能有效抑制对虾体内微生物的生长速度，尤其是对 γ-变形菌纲弧菌目的抑制效果显著，从而延长了对虾的货架寿命，而且并未对对虾的硬度等品质造成负面影响[46]；焦浈等人研究了活性冰对三文鱼片表面单增李斯特菌的消杀效果，发现在 4 ℃条件下，活性冰在 5 d 内不仅能有效抑制三文鱼片表面的李斯特菌生长，还能减缓三文鱼片中 TVB-N 值和 pH 值的上升，从而对三文鱼片起到了显著的保鲜作用[47]。

表 1 总结了国内外现有研究中等离子体冷链消杀技术的应用效果，涵盖等离子体类型、测试条件、目标微生物种类及消杀效果等关键参数，希望能为相关领域研究人员提供系统性的参考依据。

3　等离子体在冷链环境下对微生物的消杀机制

上文介绍了等离子体的冷链消杀效应。可以看出，当冷链环境温度降低至 0 ℃以下时，等离子体对病原微生物的消杀效果会发生显著变化。其主要原因在于，冰层的存在会对活性粒子作用于微生物的过程产生显著影响。目前，针对等离子体在冷冻温区对冰层中病原微生物的消杀机制，国内外研究人员主要围绕 3 个问题开展研究工作。

1）哪些活性粒子起到关键作用

现有研究表明，等离子体在冷链低温环境下对病原微生物的消杀效果主要是多种活性粒子的协同作用，目前可以确认的关键活性粒子主要是 N_2O_5

表 1　等离子体冷链消杀效果国内外相关研究成果

Table 1　Results of domestic and international research on the effectiveness of plasma cold-chain disinfection

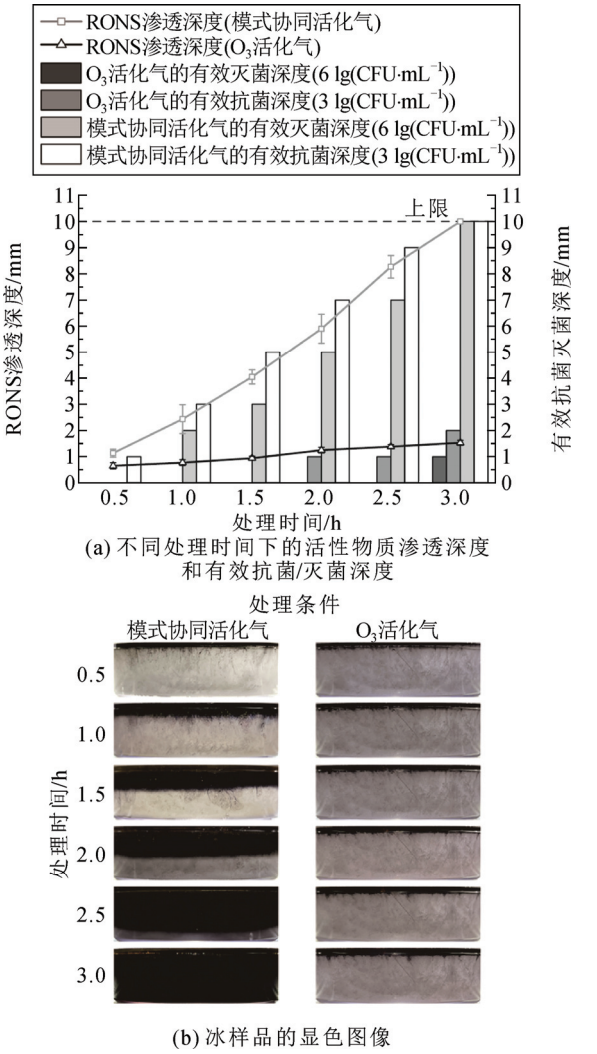
处理方式	等离子体类型	测试条件	目标微生物	消杀效果
直接处理	射流[42]	煮熟鸡胸肉、火腿切片(处理后 10 ℃储存 7 d)	李斯特菌	杀灭 4.73 lg(CFU·mL^{-1})鸡胸肉接种的细菌，杀灭 6.52 lg(CFU·mL^{-1})火腿切片接种的细菌，处理后 10 ℃储存 7 d 未检出存活菌
	射流[41]	玉米沙拉叶片(处理后 4 ℃冷藏 72 h)	大肠杆菌	杀灭 4.1 lg(CFU·mL^{-1})细菌，处理后 4 ℃冷藏 72 h 内叶片光化学效率未显著变化
间接处理	活化气(DBD)[49]	冷藏草莓(4 ℃)	真菌	储存期间减少真菌含量约 2 lg(CFU·mL^{-1})，延缓腐烂
	活化气(DBD)[50]	生牛肉块(−18 ℃)	大肠杆菌	降低 30.5%菌含量(约 0.16 lg(CFU·mL^{-1}))，且不影响牛肉品质
	活化气(DBD)[53]	干燥/覆冰的塑料/铜片表面(–20 ℃)	SARS-CoV-2 假病毒模型	干燥：杀灭 2.0 lg(CFU·mL^{-1})，冰层中：杀灭 1.2 lg(CFU·mL^{-1})，抑制效果减弱
	活化气(DBD)[54]	1 mm 冰层(–20 ℃)	大肠杆菌	杀灭 1.2 lg(CFU·mL^{-1})细菌
	活化气(模式协同)[55]	–80~–20 ℃冰层(1~4 mm 厚)	鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌	–20 ℃：杀灭 1~4 mm 冰层中鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌超 6.0 lg(CFU·mL^{-1})； –40 ℃：杀灭 1~4 mm 冰层中鼠伤寒沙门氏菌超 6.0 lg(CFU·mL^{-1})，杀灭 1~2 mm 冰层中金黄色葡萄球菌超 6.0 lg(CFU·mL^{-1})； –80 ℃：杀灭 1 mm 冰层中鼠伤寒沙门氏菌和金黄色葡萄球菌超 4.0 lg(CFU·mL^{-1})
	活化气(模式协同)[56]	–20 ℃，10 mm 厚冰层，1.14 m^3 消杀空间	金黄色葡萄球菌	整体杀灭效果超 6.0 lg(CFU·mL^{-1})，有效消杀深度达 10 mm (对 10 mm 冰层处细菌的杀灭效果保持 6.0 lg(CFU·mL^{-1}))
	活性冰[45]	鱼类–12 ~ –6 ℃储存 30 d、肉类(鸡、猪、牛)–2~0 ℃储存 30 d	大肠杆菌	30 d 内无大肠杆菌检出，保质期延长 4~5 倍，抑制异味和变色
	活性冰[46]	东方对虾(0~4 ℃储藏 6 d)	食品自带微生物群落	显著抑制微生物生长(减少约 2.5 lg(CFU·mL^{-1}))，对 Γ-变形菌纲弧菌目生长抑制效果较为明显，有效抑制脂质氧化与蛋白质分解，延缓鲜虾的腐败过程，保持硬度
	活性冰[47]	三文鱼片(4 ℃储藏 5 d)	单增李斯特菌	菌落明显减少，第 3 天效果最佳(减少约 2.2 lg(CFU·mL^{-1}))，第 5 天减少约 1.5 lg(CFU·mL^{-1})，延缓 TVB-N 和 pH 值上升

等气相高价态氮氧化物以及 H_2O_{2aq}、NO_{2aq}^- 和 HNO_{3aq}(“aq”下标代表液相活性粒子，下同)等长寿命液相活性粒子。例如，本课题组对等离子体冷链消杀过程中产生的气/液相活性粒子进行了检测，并将活性粒子浓度与消杀效果进行关联分析[55]。可以看出，富含 N_2O_5 等气相高价态氮氧化物的模式协同活化气具有明显强于 O_3 活化气和 NO_x 活化气的消杀效果。此外，对液相活性粒子的检测结果表明，H_2O_{2aq}、NO_{2aq}^- 和 HNO_{3aq} 等长寿命液相活性粒子的浓度变化也与消杀效果变化呈现强相关性[56]。值得注意的是，短寿命液相活性粒子如 $ONOO_{aq}^-$/$ONOOH_{aq}$ 也可能在等离子体冷链消杀过程中起到重要作用。例如，Guo 等人认为，H_2O_{2aq} 与 NO_{2aq}^- 在酸性环境下反应生成的 $ONOOH_{aq}$ 对冰层中病原微生物的消杀做出了重要贡献[54]。然而，冰层融化后短寿命液相活性粒子因迅速分解难以及时检测，并且现有检测方法也无法实时原位检测冰层中短寿命液相活性粒子，因此短寿命活性粒子的作用机制有待进一步研究。

2）活性粒子如何渗透作用到冰层中的病原微生物

现有研究表明活性粒子主要通过气-冰传质与化学反应渗透作用到冰层中的病原微生物。因此，O_3 等亨利系数较小、在冰层中加载性较差的活性粒子往往渗透较浅；而 H_2O_2、N_2O_5 与 HNO_3 等亨利系数较大、在冰层中加载性好的活性粒子往往能够实现深层渗透作用。例如，本课题组采用显色方法研究了等离子体活化气处理过程中活性粒子在冰层中的渗透情况并将其与消杀深度进行关联分析[56]。结果见图 6，在相同的处理时间下，模式协同活化气处理时间达到 3 h 时，活性粒子渗透深度达到 10 mm。而 O_3 活化气处理 3 h 的活性粒子渗透深度仅为 1.53 mm。2 种活化气的活性粒子渗透深度均与其消杀深度的变化高度相符。本课题组进一步采用切片方法对不同深度的冰层进行活性粒子测定[56]，结果如图 7 所示。亨利系数较小的 O_3 主要聚集在冰面 1 mm 区域，而渗透进冰层深处的活性粒子主要是 H_2O_{2aq} 和 HNO_{3aq} 等亨利系数较大的粒子。

此外，活性粒子还可通过化学反应相互影响其渗透行为。例如，根据图 7 的活性粒子检测结果，经过模式协同活化气体处理 3 h 后，尽管 NO_{2aq}^- 的亨利系数较大，但其并未显著渗透进入冰层。冰层



(a) 不同处理时间下的活性物质渗透深度和有效抗菌/灭菌深度

(b) 冰样品的显色图像

图 6 等离子体活化气处理下活性粒子的渗透深度与有效抗菌/灭菌深度(3、6 lg(CFU·mL^{-1}))之间的相关性

Fig.6 Correlation between the penetration depth of reactive species and the effective antibacterial/sterilization (3, 6 lg(CFU·mL^{-1})) depth under the plasma-activated gas treatment

表面 2 mm 深度处的 NO_{2aq}^- 浓度在模式协同活化气处理 3 h 后甚至要低于处理 1 h 的对应值。这是由于 O_{3aq} 会随着处理时间的延长在冰面迅速积累，并与 NO_{2aq}^- 发生反应生成 NO_{3aq}^-，从而导致 NO_{2aq}^- 在冰层中的渗透效果受到明显抑制。

3）等离子体消杀冰层中病原微生物的生物学机制是什么

目前，冷冻温区下等离子体对冰层中微生物消杀的内在生物学机制研究极少，只发现了微生物在冷冻温度下会进入休眠状态，进而对活性粒子产生更强的抗性[51-52]。考虑到冰层中休眠微生物结构组成相比于常温环境并未发生显著改变，且主要消杀因子均为活性粒子，此时等离子体消杀的生物学机

制应与常温下相似，即主要是通过活性粒子对细胞壁/膜、胞内 DNA 和蛋白质等生物大分子的损伤实现对病原微生物消杀。一方面，活性粒子可以氧化细胞壁/膜成分(脂多糖、肽聚糖、膜脂、膜蛋白等)改变其通透性，进而破坏细胞壁/膜结构并导致细胞裂解；另一方面，活性粒子还可以诱导细胞内的 DNA 和蛋白质等生物大分子产生氧化损伤，从而引起细胞正常生理活动失常，进而导致微生物死亡。例如，O_{3aq} 主要通过氧化细胞壁/膜成分改变其通透性，破坏细胞壁/膜导致细胞裂解和 DNA、蛋白质损伤来杀灭微生物[20]；H_2O_{2aq} 可以通过调节转录因子使微生物失活，影响基因调节、蛋白质稳定性和 DNA 结合，从而导致氧化应激反应和细胞损伤[24,57]；$ONOOH_{aq}$ 对细胞具有氧化诱变的能力，能够氧化或硝化蛋白质酪氨酸残基、硫醇和不饱和脂肪酸等生物大分子，改变细胞膜通透性，使更多的活性粒子进入细胞中[23]；NO_2 会与 H_2O 反应生成 HNO_{2aq} 和 HNO_{3aq}，降低液体环境的 pH 并形成酸性环境，进而通过破坏细胞壁和细胞膜、影响酶活性、改变基因表达等途径导致细菌死亡[58]。此外，由于冰层的存在，冷链环境下等离子体的消杀过程必然与常温环境下有所区别。本文以等离子体活化气为例进行介绍，如图 8 所示。

当等离子体活化气作用到冰层后，其中的气相活性粒子通过气-冰传质与化学反应，产生 O_{3aq}、H_2O_{2aq}、H^+_{aq}、NO^-_{3aq}、$ONOO^-_{aq}$/$ONOOH_{aq}$ 等活性粒子。这些活性粒子在冰层中具有显著的渗透差异性，其中 O_{3aq} 仅作用于表层，而 H_2O_{2aq}、H^+_{aq}、NO^-_{3aq} 等活性粒子可以渗透作用到深层部位。值得注意的是，$ONOO^-_{aq}$/$ONOOH_{aq}$ 理论上可以通过 NO_3 与冰层反应产生[59]，但受限于检测手段，其在冰层中的渗透深度和作用机制仍未明确，有待进一步研究。

4　结论和展望

近年来，面向现有冷链消杀技术的瓶颈问题与保护人民生命健康迫切需求，国内外同行及本课题组围绕低温休眠病原体的消杀是否有效、低温环境

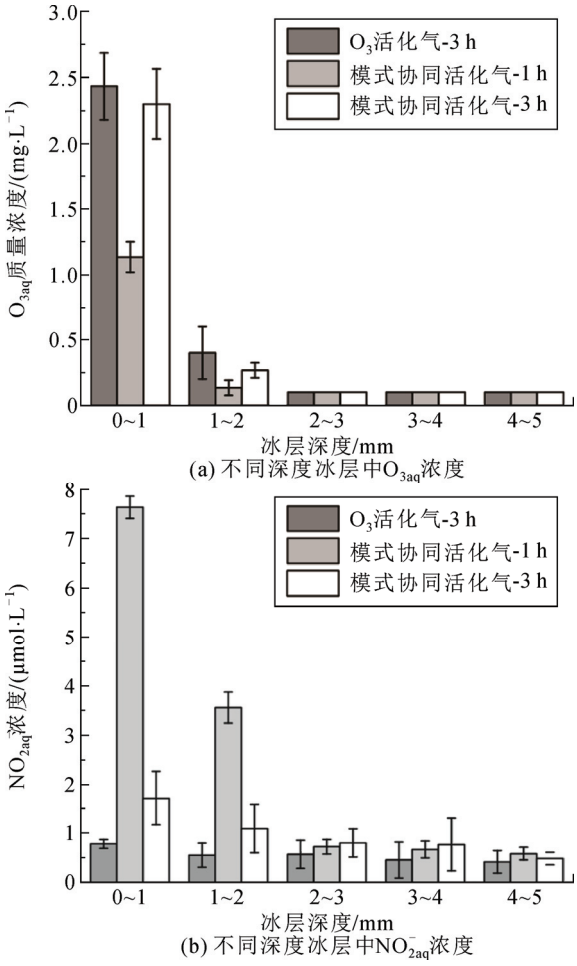


图 7　等离子体活化气处理后不同深度冰层中活性粒子和 pH 检测结果

Fig.7　Measurement of reactive species and pH in ice layers at different depths after plasma-activated gas treatment

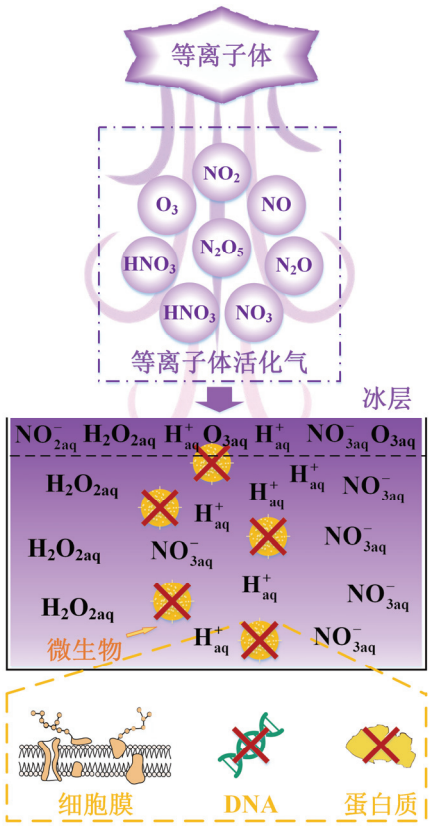


图 8　等离子体活化气对冰中微生物的消杀机理示意图

Fig.8　Schematic diagram of the inactivation mechanism of the plasma-activated gas on microorganisms in ice

中活性粒子的生成及扩散如何增效，如何强化活性粒子在冰层中的渗透作用这 3 个关键科学与技术问题，探索了等离子体在冷链消杀领域的应用潜力，主要进展如下。

1）技术上，确定了适用于冷链消杀的等离子体放电类型与应用形式，开发出了基于空气放电模式协同的等离子体活化气技术，可以稳定产生高浓度高价态活性氮粒子，实现大范围弥散作用于冷链空间各个部位进行高效消杀。

2）效果上，验证了等离子体活化气的冷链消杀效果，发现模式协同活化气可以在复杂冷链环境下对物体表面及冰层内部的病原微生物进行高效消杀，杀灭率达到 99.999 9%，冰层渗透深度可达 10 mm，有效消杀空间超过 1 m^3。

3）机制上，初步揭示了几种长寿命活性粒子在冷链消杀中的关键作用，发现活性粒子可以通过气-冰传质和化学反应渗透进入冰层深处作用于病原微生物，进而通过对细胞壁/膜、胞内 DNA 和蛋白质等生物大分子的损伤实现消杀效果。

未来，围绕等离子体冷链消杀技术，可以从以下 3 个方面进一步深化研究。

1）针对低温消杀有效性确定，可以拓展等离子体技术对芽孢、包膜病毒等顽固病原体的消杀验证，建立冷链相关病原体的广谱消杀研究数据库。

2）针对活性粒子生成与扩散增效，可以采用传感器技术建立针对活性粒子的原位在线监测与反馈控制系统，进一步通过多风源阵列布局结合流体力学仿真计算优化大空间内的粒子输运路径，实现关键活性粒子的定向生成与强效扩散。

3）针对活性粒子的冷链消杀机制，进一步开发适用于冰内短寿命活性粒子的检测试剂及方法，并结合生物学诊断技术，深入阐释活性粒子在冰层中的加载、渗透、转化途径以及原位杀灭病原微生物的内在机制，推动该技术向应用发展。

参考文献 References

[1] BEALES N. Adaptation of microorganisms to cold temperatures, weak acid preservatives, low pH, and osmotic stress: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2004, 3(1): 1-20.

[2] RICKE S C, DAWOUD T M, KIM S A, et al. Salmonella cold stress response: mechanisms and occurrence in foods[M]. San Diego, USA: Elsevier Academic Press Inc., 2018: 1-38.

[3] LIU C M, SHEN Y, YANG M, et al. Hazard of staphylococcal enterotoxins in food and promising strategies for natural products against virulence[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(8): 2450-2465.

[4] AKTAR M A, ALAM M M, AL-AMIN A Q. Global economic crisis, energy use, CO_2 emissions, and policy roadmap amid COVID-19[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 26: 770-781.

[5] GUAN D B, WANG D P, HALLEGATTE S, et al. Global supply-chain effects of COVID-19 control measures[J]. Nature Human Behaviour, 2020, 4(6): 577-587.

[6] GUO Y R, CAO Q D, HONG Z S, et al. The origin, transmission and clinical therapies on coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak–an update on the status[J]. Military Medical Research, 2020, 7(1): 11.

[7] MAZZOLENI S, TURCHETTI G, AMBROSINO N. The COVID-19 outbreak: from “black swan” to global challenges and opportunities[J]. Pulmonology, 2020, 26(3): 117-118.

[8] PANG X H, REN L L, WU S S, et al. Cold-chain food contamination as the possible origin of COVID-19 resurgence in Beijing[J]. National Science Review, 2020, 7(12): 1861-1864.

[9] LIU P P, YANG M J, ZHAO X, et al. Cold-chain transportation in the frozen food industry may have caused a recurrence of COVID-19 cases in destination: successful isolation of SARS-CoV-2 virus from the imported frozen cod package surface[J]. Biosafety and Health, 2020, 2(4): 199-201.

[10] WALTENBURG M A, ROSE C E, VICTOROFF T, et al. Coronavirus disease among workers in food processing, food manufacturing, and agriculture workplaces[J]. Emerging Infectious Diseases, 2021, 27(1): 243-249.

[11] GUAN Z W, LIU P, ZHOU T F, et al. Study on the light field regulation of UVC-LED disinfection for cold chain transportation[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1285.

[12] LAROUSSI M. Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996, 24(3): 1188-1191.

[13] GUO L, ZHAO P Y, JIA Y K, et al. Inactivation of airborne pathogenic microorganisms by plasma-activated nebulized mist[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 459: 132072.

[14] 夏文杰，刘定新. Ar 等离子体射流处理乙醇水溶液的放电特性及灭菌效应[J]. 电工技术学报，2021，36(4)：765-776.
XIA Wenjie, LIU Dingxin. Discharge characteristics and bactericidal effect of Ar plasma jet treating ethanol aqueous solution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(4): 765-776.

[15] GUO L, ZHANG J, LIU D X, et al. Microbial inactivation in model tissues treated by surface discharge plasma[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(1): 015205.

[16] 张丽阳，郭云涛，帖金凤，等. 大气压栅状介质阻挡放电等离子体空气消毒研究[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2972-2987.
ZHANG Liyang, GUO Yuntao, TIE Jinfeng, et al. Air disinfection by atmospheric pressure grating-like dielectric barrier discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2972-2987.

[17] 卢新培，罗婧怡，聂兰兰，等. 等离子体医学研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3555-3579.
LU Xinpei, LUO Jingyi, NIE Lanlan, et al. Progresses in plasma medicine research[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3555-3579.

[18] 刘志杰，陈 旻，刘定新. 大气压冷等离子体的理化特性检测方法综述[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4196-4214.
LIU Zhijie, CHEN Min, LIU Dingxin. Review of detection methods for physicochemical characteristics of atmospheric pressure cold plasma[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4196-4214.

[19] 邵 涛，窦立广，张 帅，等. 等离子体在环境病原微生物消杀中的应用[J/OL]. 高电压技术，2025：1-22(2025-04-23)[2025-05-10].

https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20250245.
SHAO Tao, DOU Liguang, ZHANG Shuai, et al. Application of plasma technology for microbial inactivation and environmental sanitization[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-22 (2025-04-23)[2025-05-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250245.

[20] XUE W Y, MACLEOD J, BLAXLAND J. The use of ozone technology to control microorganism growth, enhance food safety and extend shelf life: a promising food decontamination technology[J]. Foods, 2023, 12(4): 814.

[21] LI L C, WU F, CHEN Y, et al. Reactions of microorganisms with atomic oxygen radical anions: damage of cells and irreversible inactivation[J]. Journal of Nanomaterials, 2019, 2019: 2483060.

[22] STERN A M, ZHU J. An introduction to nitric oxide sensing and response in bacteria[M]. San Diego, USA: Elsevier Academic Press Inc., 2014: 187-220.

[23] RUBBO H, TROSTCHANSKY A, O'DONNELL V B. Peroxynitrite-mediated lipid oxidation and nitration: mechanisms and consequences[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2009, 484(2): 167-172.

[24] 郭　莉，赵鹏瑜，黄玲玲，等. 等离子体活化水用于微生物消杀的意义和现状[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2955-2971.
GUO Li, ZHAO Pengyu, HUANG Lingling, et al. Significance and current status of plasma-activated water for microbial inactivation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2955-2971.

[25] GUO L, YAO Z Q, YANG L, et al. Plasma-activated water: an alternative disinfectant for S protein inactivation to prevent SARS-CoV-2 infection[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 127742.

[26] WANG Z F, LIU L B, LIU D X, et al. Combination of NO_x mode and O_3 mode air discharges for water activation to produce a potent disinfectant[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31(5): 05LT01.

[27] 张明岩，罗三土，彭文艺，等. 考虑微量 CO_2 影响的 He+Air 等离子体反应动力学研究[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4868-4877.
ZHANG Mingyan, LUO Santu, PENG Wenyi, et al. Reaction kinetics research on He+Air plasmas considering the influence of trace CO_2[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4868-4877.

[28] ZHAO P Y, MA S H, GUO L, et al. Inactivation of microorganisms on fabrics using plasma-activated nebulized mist driven by different plasma gases[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 471: 134365.

[29] CHEN Z T, GARCIA JR G, ARUMUGASWAMI V, et al. Cold atmospheric plasma for SARS-CoV-2 inactivation[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(11): 111702.

[30] WANG X, WANG W, LIU Z J, et al. Mode transition of air surface micro-discharge and its effect on the water activation and antibacterial activity[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(9): 095013.

[31] BISAG A, ISABELLI P, LAGHI G, et al. Cold atmospheric plasma decontamination of SARS-CoV-2 bioaerosols[J]. Plasma Processes and Polymers, 2022, 19(3): e2100133.

[32] MAHO T, BINOIS R, BRULÉ-MORABITO F, et al. Anti-bacterial action of plasma multi-jets in the context of chronic wound healing[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20): 9598.

[33] MAHBUB P, DUKE M. Scalability of advanced oxidation processes (AOPs) in industrial applications: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118861.

[34] PHANIENDRA A, JESTADI D B, PERIYASAMY L. Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases[J]. Indian Journal of Clinical Biochemistry, 2015, 30(1): 11-26.

[35] LU X P, LIU D W, XIAN Y B, et al. Cold atmospheric-pressure air plasma jet: physics and opportunities[J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(10): 100501.

[36] XU H, CHEN C, LIU D X, et al. Contrasting characteristics of aqueous reactive species induced by cross-field and linear-field plasma jets[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(24): 245201.

[37] LIU Z C, LIU D X, CHEN C, et al. Physicochemical processes in the indirect interaction between surface air plasma and deionized water[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(49): 495201.

[38] 刘定新，张基珅，王子丰，等. 等离子体活化介质技术及其生物医学应用[J]. 电工技术学报，2024，39(12)：3855-3868.
LIU Dingxin, ZHANG Jishen, WANG Zifeng, et al. Plasma-activated media technology and its biomedical applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3855-3868.

[39] 周仁武，屈仲平，孙　静，等. 大气压低温等离子体固氮技术研究进展[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3640-3653.
ZHOU Renwu, QU Zhongping, SUN Jing, et al. Recent progress of atmospheric-pressure low-temperature plasma-enabled nitrogen fixation technology[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3640-3653.

[40] SONG M G, ROY P K, JEON E B, et al. Effect of dielectric barrier discharge plasma against *Listeria monocytogenes* mixed-culture biofilms on food-contact surfaces[J]. Antibiotics, 2023, 12(3): 609.

[41] BAIER M, GÖERGEN M, EHLBECK J, et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma: screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 22: 147-157.

[42] LEE H J, JUNG H, CHOE W, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets[J]. Food Microbiology, 2011, 28(8): 1468-1471.

[43] DOBEIC M, VADNJAL S, BAJC Z, et al. Antibacterial properties of a non-thermal, atmospheric, openair®, plasma jet in surface decontamination of eggs in shell[J]. Slovenian Veterinary Research, 2016, 53(1): 29-41.

[44] HOSSEINI S M, SAMANI B H, ROSTAMI S, et al. Design and characterisation of jet cold atmospheric pressure plasma and its effect on *Escherichia coli*, colour, pH, and bioactive compounds of sour cherry juice[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(10): 4883-4892.

[45] PIVOVAROV O, KOVALOVA O, KOSHULKO V, et al. Study of use of antiseptic ice of plasma-chemically activated aqueous solutions for the storage of food raw materials[J]. Food Science and Technology, 2021, 15(4): 95-105.

[46] 艾春梅，谢小本，廖新浴，等. 等离子体活化冰对东方对虾保鲜及品质的影响[J]. 食品与机械，2019，35(3)：130-136.
AI Chunmei, XIE Xiaoben, LIAO Xinyu, et al. Effect of plasma-activated water (PAW) ice on the quality of shrimps (*Penaeus orientalis*) during storage[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 130-136.

[47] 焦　浈，朱育攀，许航博，等. 等离子体活化水冰对纯培养及三文鱼片表面单增李斯特菌杀菌效果研究[J]. 郑州大学学报(理学版)，2019，51(3)：97-103.
JIAO Zhen, ZHU Yupan, XU Hangbo, et al. Plasma-activated water ice inactivation of listeria monocytogenes in pure culture and salmon strips[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2019, 51(3): 97-103.

[48] LEE T, PULIGUNDLA P, MOK C. Corona discharge plasma jet inactivates food-borne pathogens adsorbed onto packaging material surfaces[J]. Packaging Technology and Science, 2017, 30(10): 681-690.

[49] MOON S Y, MOON A Y. Decontamination effects of ozone generated in an atmospheric-pressure air plasma on packaged fruits[J]. Applied Science and Convergence Technology, 2019, 28(2): 17-23.

[50] LI P R, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. Experimental investigation of bacterial inactivation of beef using indirect cold plasma in cold chain and at room temperature[J]. Foods, 2024, 13(17): 2846.

[51] ZENG B, ZHAO G Z, CAO X H, et al. Formation and Resuscitation of Viable but Nonculturable *Salmonella typhi*[J]. BioMed Research International, 2013, 2013: 907170.

[52] WONG H C, WANG P. Induction of viable but nonculturable state in *Vibrio parahaemolyticus* and its susceptibility to environmental stresses[J]. Journal of Applied Microbiology, 2004, 96(2): 359-366.

[53] ZHANG H, CHEN M, HUANG L L, et al. Using cold atmospheric plasma treated-air for COVID-19 disinfection in cold-chain environment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(40): 40LT01.

[54] GUO Y T, LIU P P, ZHANG L Y, et al. Disinfection of *Escherichia coli* in ice by surface dielectric barrier discharge plasma[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(9): 090601.

[55] CHEN M, YAN J W, FENG Y, et al. Sterilization of *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus* aureus in different cold-chain environments by combining NO_x mode and O_3 mode air discharges[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31(12): 125006.

[56] CHEN M, LIU D X, WANG Z F, et al. Sterilization effect and mechanism exploration of a mode-combination method on *Staphylococcus aureus* in thick ice layers in a large sealed freezer[J]. Plasma Processes and Polymers, 2024, 21(5): 2300221.

[57] LINLEY E, DENYER S P, MCDONNELL G, et al. Use of hydrogen peroxide as a biocide: new consideration of its mechanisms of biocidal action[J]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2012, 67(7): 1589-1596.

[58] LUND P A, DE BIASE D, LIRAN O, et al. Understanding how microorganisms respond to acid pH is central to their control and successful exploitation[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 556140.

[59] WANG Z F, WANG X Y, XU S H, et al. Off-site production of plasma-activated water for efficient disinfection: the crucial role of high valence NO_x and new chemical pathways[J]. Water Research, 2024, 267: 122541.



陈 旻
1996—，男，博士生
主要从事等离子体消毒灭菌技术的研究
E-mail: cm960926@stu.xjtu.edu.cn

CHEN Min
Ph.D. candidate



张基珅(通信作者)
1995—，男，博士，助理教授
主要从事等离子体生物医学技术的研究
E-mail: zjs2023@xjtu.edu.cn

ZHANG Jishen
Ph.D.
Assistant professor
Corresponding author

收稿日期 2025-02-25 修回日期 2025-05-10 编辑 曾文君