第 52 卷 第 6 期：2962-2971 高电压技术 Vol.52, No.6: 2962-2971
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251698

# 等离子体活化水雾的消毒与安全性研究

张子硕[1,2]，朱艺文[3]，张 冲[3]，任 哲[4]，邵 涛[2]，刘文正[1]，张 帅[2]
（1. 北京交通大学电气工程学院，北京 100091；2. 中国科学院电工研究所，北京 100190；
3. 北京化工大学材料科学与工程学院，北京 100029；4. 解放军疾病预防控制中心，北京 102206）

**摘 要**：低温等离子体作为新型消毒技术，可在气液界面产生多种活性物种并向液相传质形成等离子体活化水；并进一步雾化得到的等离子体活化水雾能够提高活性物种在目标表面的覆盖与渗透，有望实现高效消杀。为此搭建了微气泡辅助液相放电等离子体特性诊断平台，研究了放电等离子体的电学、光学特性和理化参数(pH、温度、$NO_x^-$ 浓度)演变规律，并探究了等离子体活化水雾的杀菌消毒效果、生物安全性和金属腐蚀性。结果表明，微气泡辅助液相纳秒脉冲放电可稳定制备等离子体活化水，活化过程中 pH 显著降低，$NO_x^-$ 浓度持续累积且 $NO_3^-$ 更稳定。等离子体活化水雾灭活效果随消毒剂量提高而增强，最高剂量下对金黄色葡萄球菌与 H1N1 的杀灭率分别达 99.8%与 99.99%，并通过破坏细胞膜完整性致胞内物质外泄实现失活。安全性方面，不锈钢耐腐蚀，碳钢腐蚀较明显；细胞、皮肤、眼刺激及急性吸入评价总体显示生物安全性良好。该研究为等离子体活化水雾杀菌消毒应用和安全性评估提供了参考。

**关键词**：等离子体活化水雾；光电特性；活性物种；杀菌消毒；安全性

## Study on Disinfection and Safety of Plasma-activated Water and Mist

ZHANG Zishuo[1,2], ZHU Yiwen[3], ZHANG Chong[3], REN Zhe[4], SHAO Tao[2], LIU Wenzheng[1], ZHANG Shuai[2]
(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China;
2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
4. PLA Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China)

**Abstract**：Low-temperature plasma is an emerging disinfection technology that generates multiple reactive species at the gas-liquid interface, forming plasma-activated water. Atomizing this water into a mist enhances the coverage and penetration of reactive species, offering potential for highly efficient sterilization and disinfection. We established a diagnostic platform for microbubble-assisted liquid-phase discharge plasma characteristics, and investigated the electrical and optical properties alongside physicochemical parameters (pH, temperature, $NO_x^-$ concentration) of such plasmas. We further examined the bactericidal efficacy, biosafety, and metal corrosion potential of plasma-activated water and mist(PAWM). The results show that microbubble-assisted liquid-phase nanosecond pulse discharge enables the stable production of plasma-activated water, with a significant decrease in pH during the activation process, $NO_x^-$ concentrations accumulate continuously, and $NO_3^-$ remains more stable. The inactivation efficacy of plasma-activated water mist increases with higher disinfection doses, achieving the killing rates of 99.8% for Staphylococcus aureus and 99.99% for H1N1 at the maximum dose. This inactivation is achieved by disrupting cell membrane integrity, leading to the leakage of intracellular substances. In terms of safety, stainless steel exhibits corrosion resistance, whereas carbon steel shows more pronounced corrosion. Overall, evaluations of cellular, skin, and ocular irritation, along with acute inhalation toxicity, indicate favourable biological safety. This study provides a reference for the application and safety assessment of plasma-activated water and mist sterilization and disinfection.

**Key words**：plasma-activated water and mist; optical and electrical characteristics; active species; sterilization; biosafety

**基金资助项目**：国家重点研发计划(2023YFC2604600)；国家自然科学基金(12375254)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFC2604600), National Natural Science Foundation of China(12375254).

## 0　引言

随着突发公共卫生事件频发以及公众健康意识的不断提升，高效、安全的杀菌消毒技术在疾病预防与环境防控中发挥着愈发重要的作用。现有的消毒方法如电离辐射法、紫外线照射等方法已经在疾病预防方面取得实际应用[1-2]。近年来，大气压低温等离子体技术因具备高效、环境友好和操作灵活等特点，在微生物灭活领域受到广泛关注[3-5]。等离子体活化水(plasma-activated water，PAW)通常由气液界面放电产生的活性物种经传质溶解进入液相形成，其主要有效组分为活性氮物种(reactive nitrogen species，RNS)与活性氧物种(reactive oxygen species，ROS)等[6-7]。上述活性物种具有高化学活性和强杀菌能力，是 PAW 实现杀菌消毒作用的关键因子。在此基础上，将 PAW 雾化形成等离子体活化水雾(plasma-activated water and mist，PAWM)，可提高活性物种在物体表面的覆盖效率与渗透能力，从而拓展其在生物医学[8-10]、农业生产[11]和食品安全[12-13]等领域的应用潜力。

等离子体活化水的高效制备主要依赖气液界面放电技术，典型放电形式包括介质阻挡放电[14](dielectric barrier discharge，DBD)、大气压等离子体射流[15-16](atmospheric pressure plasma jet，APPJ)、火花放电[17]和滑动弧放电[18]等。近年来，基于微气泡结构的气液等离子体反应器因其强化传质特性成为研究热点。微气泡具有较大的比表面积且在液体中有较长的存在时间[19-20]，有助于将放电生成的活性物种由气相传输至液相[21]；同时可以降低击穿电压并提高放电稳定性，促进含氮和含氧活性物种向液相的有效转移，从而提高 PAW 的活化效率[22-24]。

已有研究表明，通过优化放电结构与运行参数，PAWM 在农产品杀菌、医疗器械消毒及肿瘤细胞处理等方面展现出良好的应用前景[8,25]。然而，其杀菌效果仍受活性物种组成、雾滴尺寸及作用方式等因素影响，在复杂界面条件下的作用机制仍有待进一步阐明。

为实现强化传质条件下 PAWM 的高效制备，并系统评估其消杀效果与应用安全性，本文构建了一种微气泡辅助液相放电等离子体系统，开展了放电过程电学与光学特性诊断，分析活化水理化参数的演变规律；进一步考察了 PAWM 对金黄色葡萄球菌和 H1N1 病毒的消杀效果，同时从金属腐蚀性和生物安全性角度对其应用风险进行了综合评估。

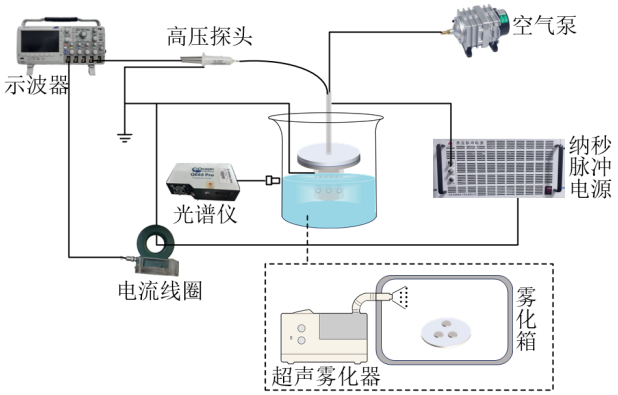
## 1　试验平台及检测方法

### 1.1　试验装置

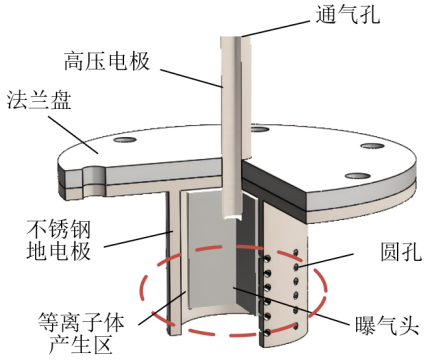
本试验构建了基于纳秒脉冲电源的微气泡辅助液相放电装置，用于制备 PAW 并进一步雾化形成 PAWM。试验系统由纳秒脉冲高压电源(HVP-20P)、微气泡放电电极、接地电极及参数测量模块构成，结构示意如图 1(a)所示。

微气泡放电电极结构剖面如图 1(b)所示，电极上部为孔径 6 mm 的不锈钢通气管，通气管连接进气泵，气体体积流量为 5 L/min；下端连接不锈钢曝气头，直径为 13 mm，向水中通气可产生直径为 5~100 μm 的微气泡。电极外侧为不锈钢圆柱形接地电极，并通过聚四氟乙烯法兰盘固定。接地电极内径 17 mm，厚度 2 mm，其侧壁周向均匀分布有阵列排列的圆孔，单个圆孔孔径大小为 2 mm。在电极下方曝气头与外侧地电极之间留有 2 mm 间隙，对通气管施加高压后在间隙通道内形成火花放电产生等离子体。

参数测量系统包括：示波器(Tektronix DPO2024B)、高压探头(North Star PVM-1)、电流互




(a) 试验系统示意图




(b) 放电电极结构剖面图

图 1　试验装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of the experimental setups

感线圈(Person 6595)、光谱仪(Ocean Optics QE65Pro)、紫外-可见分光光度计(UV-3500S)、pH仪(雷磁 PHS-3C)等。

### 1.2 $NO_x^-$浓度测量方法

本试验采用紫外-可见分光光度计测定 RNS 中 $NO_2^-$ 和 $NO_3^-$ 的浓度，使用石英比色皿盛放待测溶液。测量原理基于朗伯比尔定律，表示为：

$$A = Kbc \tag{1}$$

式中：$A$ 为吸光度；$K$ 为摩尔吸光系数，与被测物质的性质及入射光的波长 $\lambda$ 有关；$b$ 为吸收层厚度；$c$ 为待测溶液粒子浓度。

$NO_2^-$ 浓度采用磺胺-盐酸萘乙二胺比色法测定，其原理基于 $NO_2^-$ 在酸性条件下发生重氮化并偶联生成偶氮染料，在 540 nm 处出现特征吸收峰。$NO_3^-$ 浓度采用盐酸滴定法，其在 220 nm 处有典型的特征光吸收；为避免溶液中有机物的干扰，使用紫外-可见分光光度计分别测量 275 nm 和 220 nm 处的吸光度，以两者的差值来计算 $NO_3^-$ 的浓度[26]。

如图 2 所示，为实现 $NO_2^-$ 和 $NO_3^-$ 的定量分析，配制不同浓度的标准溶液并测量其在特征波长处的吸光度，获得相应的标准曲线。根据标准曲线得到 $NO_2^-$、$NO_3^-$ 浓度拟合式(2)、(3)，计算样品中 $NO_x^-$ 浓度。

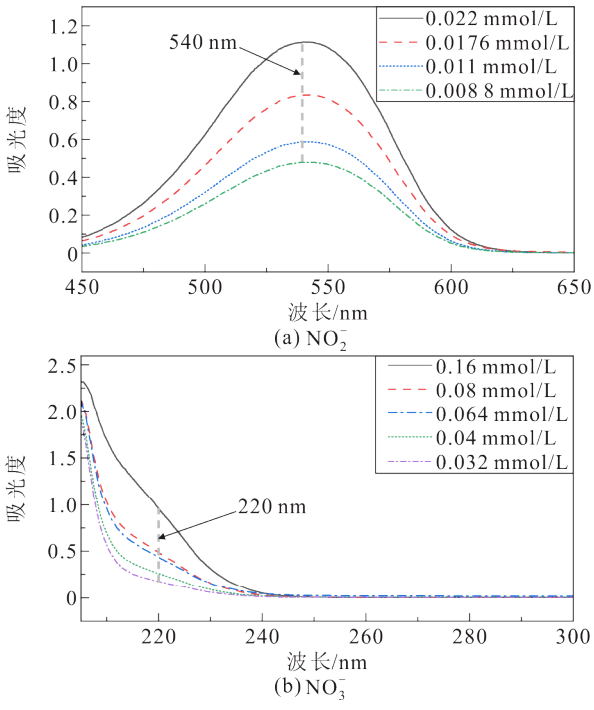



图 2 标准 $NaNO_2$、$LiNO_3$ 溶液吸光度曲线

Fig.2 Absorbance curve of standard $NaNO_2$ and $LiNO_3$ solution

$$Y_1 = 46.084\,61X_1 + 0.069\,01 \tag{2}$$

$$Y_2 = 5.903\,65X_2 + 0.015\,35 \tag{3}$$

式中：$Y_1$、$Y_2$ 分别为 $NO_2^-$、$NO_3^-$ 溶液吸光度；$X_1$、$X_2$ 为溶液 $NO_2^-$、$NO_3^-$ 浓度。

### 1.3 消毒效果评测

选用金黄色葡萄球菌和 H1N1 病毒作为代表性微生物模型，以圆形钢片作为载体进行消毒效果评测。将一定体积的微生物悬液滴加于载体表面并干燥后，置于密闭雾化箱中接受 PAWM 处理。试验时，将超声雾化器喷头与雾化箱侧壁连接，样品平皿置于雾化箱底部中央固定位置。雾化速率设置为 1.5 mL/min，并在每次正式处理前对雾化箱及喷雾装置进行 5 min 的预运行，以使雾化过程达到稳定状态，从而保证不同批次试验中喷雾条件的一致性。每批试验分别采用不同消毒剂量的等离子体活化水雾对上述平皿内排列的载体进行雾化处理。消毒剂量 $D$ 为单位体积活化水在制备过程中获得的放电能量，其计算式如式(4)所示。

$$D = \frac{P_{\text{avg}} t_{\text{d}}}{V} \tag{4}$$

式中：$P_{\text{avg}}$ 为平均放电功率，由电压、电流波形计算瞬时功率后积分得到，W；$t_{\text{d}}$ 为放电处理时间，s；$V$ 为被处理液体体积，mL。

处理结束后，通过洗脱载体表面的微生物并进行培养或感染性检测，分别计算细菌存活数或病毒灭活率，同时设置相应对照组进行比较。

### 1.4 金属腐蚀性和生物安全性试验

为系统评估等离子体活化水雾的应用安全性，本文从细胞毒性、金属腐蚀性以及动物刺激与毒性等方面开展综合评价。

#### 1.4.1 细胞毒性试验

细胞毒性采用 MTT 比色法，以小鼠成纤维细胞 L929 为模型细胞，培养于含有体积分数为 10%胎牛血清(fetal bovine serum，FBS)和 1%抗生素的杜氏改良 Eagle 培养基(Dulbecco's modified Eagle medium，DMEM)中，在标准培养条件下培养至贴壁稳定。试验中以去离子水处理组作为对照，比较不同剂量的 PAW 对细胞活性的影响。通过使用酶标仪测定各组在 450 nm 处的吸光度值以计算细胞活性。

#### 1.4.2 金属腐蚀性试验

选用不锈钢、碳钢、铜和铝作为代表性金属试样开展腐蚀性试验。试样在试验前经清洗、干燥并称量初始质量后，分别浸泡于制备的 PAW 溶液中。

试验过程中定期更换 PAW 溶液，以保证腐蚀环境的稳定性。浸泡结束后，对金属试样表面腐蚀产物进行清除，并再次称量试样质量。根据质量损失、试样表面积及浸泡时间计算金属腐蚀速率。以去离子水浸泡组作为对照，用于比较 PAW 对不同金属材料腐蚀行为的影响程度。金属腐蚀速率 $R$ 计算式为：

$$R=\frac{8.76\times10^{7}\times(m-m_{t})}{Std} \tag{5}$$

式中：$R$ 为腐蚀速率，mm/年；$m$ 为试验前金属片质量，g；$m_t$ 为试验后金属片质量，g；$S$ 为金属片表面积总值，cm²；$t$ 为试验时间，h；$d$ 为金属材料密度，kg/m³。

1.4.3　皮肤刺激性试验

如图 3 所示，试验前 24 h，使用脱毛剂去除小鼠背部脊柱两侧约 10 mm × 10 mm 区域内的毛发，确保皮肤完整、无损伤。试验时，将小鼠皮肤右侧的去毛区域用等离子体活化水雾进行喷涂，直至右侧皮肤所划区域润湿，左侧去毛皮肤不做任何处理，作为空白对照。分别于 1 、24 和 48 h 观察并记录小鼠局部皮肤红肿、瘙痒、炎症等局部反应，并按表 1 评定受试物对动物皮肤刺激强度的级别。

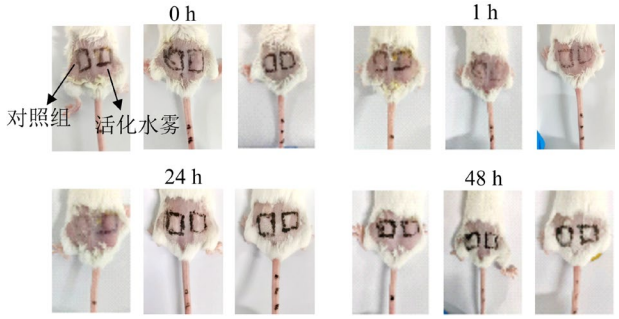



图 3　皮肤刺激性试验

Fig.3　Skin irritation test

表 1　皮肤刺激强度分级

Table 1　Skin irritation intensity classification

| 皮肤刺激指数 | 刺激强度级别 |
|---|---|
| [0，0.5) | 无刺激性 |
| [0.5，＜2.0) | 轻刺激性 |
| [2.0，＜6.0) | 中等刺激性 |
| [6.0，8.0] | 强刺激性 |

1.4.4　急性眼刺激试验

试验前 24 h 检查家兔双眼情况，如有异常者不能用于试验。试验时，将 0.1 mL 等离子体活化水滴入家兔一侧眼的结膜囊内，另一侧加等量的生理盐水作为正常对照。于滴眼后 1 、24 和 48 h 肉眼观察并记录家兔眼结膜、虹膜和角膜的损伤及恢复情况。滴眼后 24 h，进一步使用荧光素钠溶液和裂隙灯检查角膜及虹膜变化情况，对家兔眼角膜、虹膜和结膜的急性刺激反应进行评分。综合角膜、虹膜和结膜充血、水肿等反应的平均评分及恢复时间，判定受试物对眼睛的刺激强度，眼刺激反应分级标准如表 2 所示。

表 2　眼刺激反应分级标准

Table 2　Eye irritation response grading criteria

| 反应评分 | 动物数量/只 | 恢复时间/d | 损伤类型 |
|---|---|---|---|
| 角膜损害<1 和虹膜损害<1 和结膜充血<2 和结膜水肿<2 | ≥2 | ≤21 | 无刺激性 |
| 角膜损害≥1 或虹膜损害≥1 或结膜充血≥2 或结膜水肿<2 | ≥2 | ≤7<br>≤21 | 轻刺激性<br>刺激性 |
| 角膜损害≥3 或虹膜损害≥1.5 | ≥2 | | 腐蚀性 |
| 角膜损害≥1 或虹膜损害≥1 或结膜充血≥1 或结膜水肿≥1 | ≥1 | >21 | |

1.4.5　急性吸入毒性试验

采用静式染毒方式，使受试小鼠持续吸入等离子体活化水雾 2 h，染毒质量浓度设定为 10 000 mg/m³。本文所指的染毒浓度是指在急性吸入毒性试验中，单位体积空气中所含等离子体活化水雾的质量浓度用于表征试验动物在规定时间内实际吸入的 PAWM 暴露水平。染毒结束后，将小鼠放回笼内饲养，继续观察 14 d，记录小鼠的一般状态、中毒症状及死亡时间。于染毒结束后第 7 天和第 14 天分别称量小鼠的体重。若在 14 d 内未见小鼠死亡，可判定受试物半数致死浓度($LC_{50}$)>10 000 mg/m³。

## 2　结果与讨论

### 2.1　放电特性

图 4 给出了纳秒脉冲激励下微气泡辅助液相放电等离子体的典型电压、电流波形以及对应的瞬时功率及单脉冲能量。在脉冲频率为 1 000 Hz、脉冲宽度为 200 ns 的条件下，放电击穿电压和电流峰值分别约为 5.1 kV 和 10.6 A。由瞬时功率与能量演化曲线可以看出，单脉冲功率在电压上升沿阶段迅速增加并形成峰值，最大瞬时功率约为 42.5 kW。随后等离子体通道形成，放电能量持续累积，在脉冲结束后单脉冲能量稳定为约 6.5 mJ。

根据电压-电流积分法可计算得到放电的平均

功率随放电时间变化如图 5 所示。可以观察到，在连续放电初期，平均功率和最大瞬时功率存在一定波动，但随着放电过程的进行逐渐趋于稳定。这表明在微气泡辅助条件下，液相放电系统可实现较长时间的稳定运行。

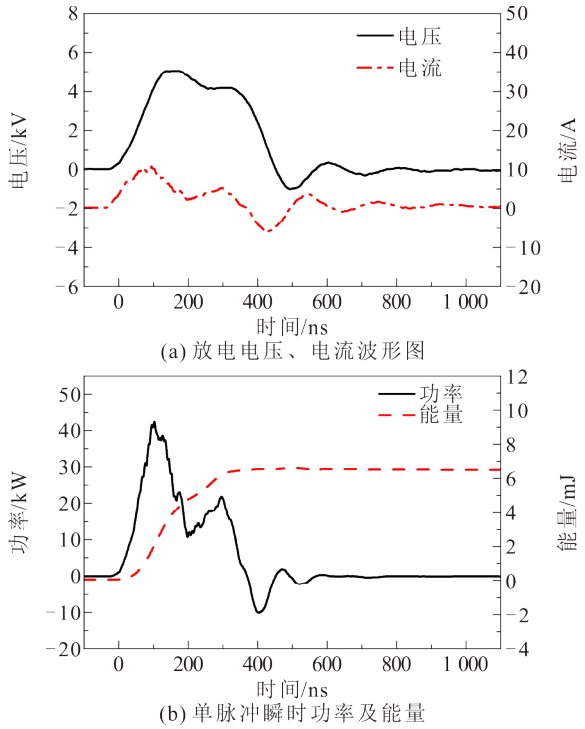



图 4 电压电流波形、瞬时功率、单脉冲能量特性及典型放电图像

Fig.4 Voltage-current waveform, instantaneous power, single pulse energy characteristics during discharge and typical discharge image

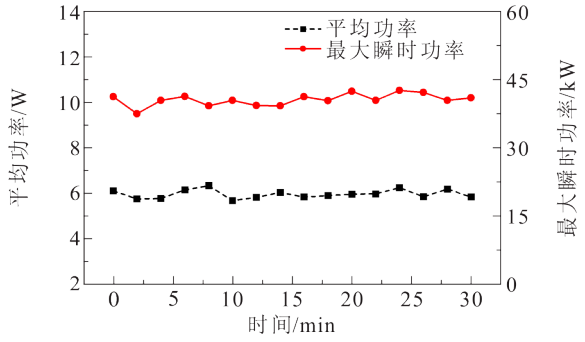



图 5 放电最大瞬时功率及平均功率变化

Fig.5 Discharge maximum instantaneous power and power density variation

图 6 为微气泡辅助液相放电的光发射光谱。在 300~400 nm 波段内可以观察到明显的 $N_2$ 第二正峰带系($C^3\Pi_u$-$B^3\Pi_g$)的发射谱带；此外，在 656 nm 和 777 nm 处分别检测到 H 和 O 原子的发射峰，反映了水分子碰撞解离过程的存在。随着放电时间的延长，各特征谱线整体强度呈下降趋势，说明活性自由基的生成速率逐渐减缓。这可能与溶液电导率升高导致局部电场强度下降以及溶液温度升高引起气泡稳定性降低等因素有关[27]。

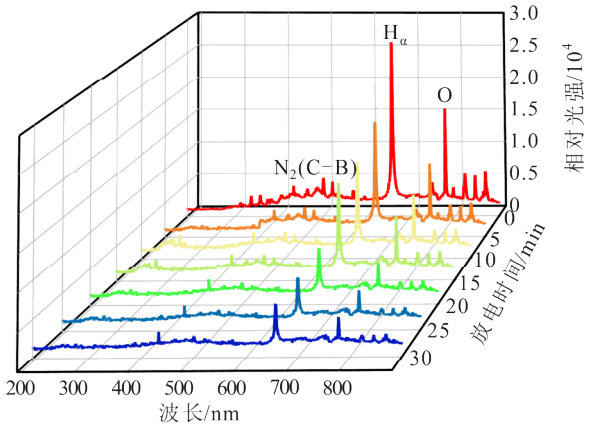



图 6 微气泡辅助液相放电的光发射光谱

Fig.6 Optical emission spectrum of microbubble-assisted liquid-phase discharge

## 2.2 理化参数

等离子体放电过程中产生的活性物种不断向液相转移，使等离子体活化水的理化参数随放电时间发生显著变化。图 7 给出了 PAW 中 $NO_x^-$ 浓度以及 pH 和温度随放电时间的变化规律。

如图 7(a)所示，在放电初期(2~4 min)，$NO_2^-$ 在 $NO_x^-$ 中所占比例相对较高，为 30%~35%，表明此阶段含氮活性物种的生成以亚硝酸根等中间产物为主。随着放电时间的延长，$NO_3^-$ 浓度持续增加并逐渐占据主导地位，而 $NO_2^-$ 浓度增长趋于缓慢，其在 $NO_x^-$ 中的占比逐步下降。在 14~20 min 内，$NO_2^-$ 的占比已降低至 12%~15%，对应 $NO_3^-$ 占比超过 85%。上述结果说明，$NO_2^-$ 在 PAW 中主要作为过渡性产物存在，而 $NO_3^-$ 则是随放电时间累积的主要稳定含氮物种。

图 7(b)显示了 PAW 的 pH 和温度随放电时间的变化情况。随着放电能量的持续注入，水温由初始环境温度 22 ℃近似线性升高至 34.4 ℃。与此同时，活化水 pH 值在放电初期快速下降，4 min 后由 6.87 降至 3.85，随后随放电时间延长变化趋于平缓。这主要与放电过程中生成的 $NO_2^-$、$NO_3^-$ 等含氮物种在水中形成酸性产物有关。

为进一步分析 PAW 中 $NO_x^-$ 的稳定性，图 8 给

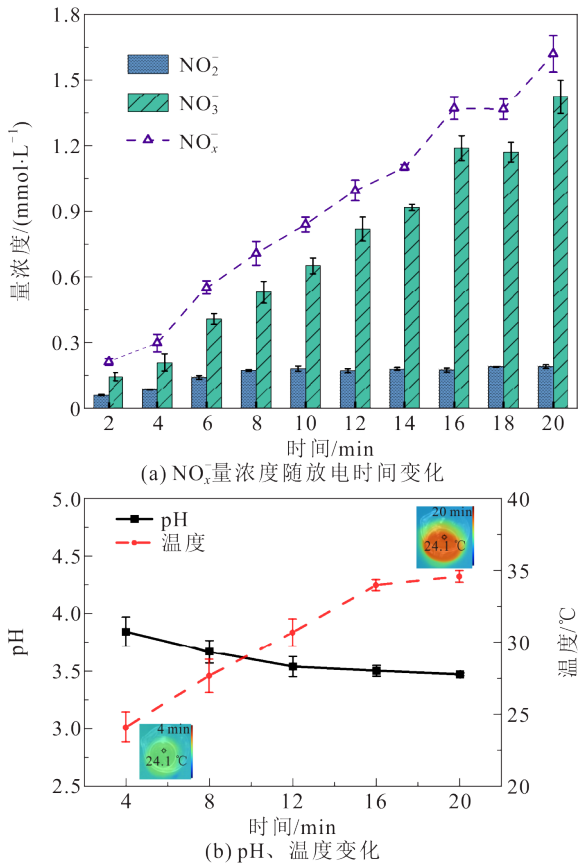



图 7　$NO_x^-$ 量浓度、pH 和温度变化

Fig.7　Changes of $NO_x^-$ concentration、pH and temperature

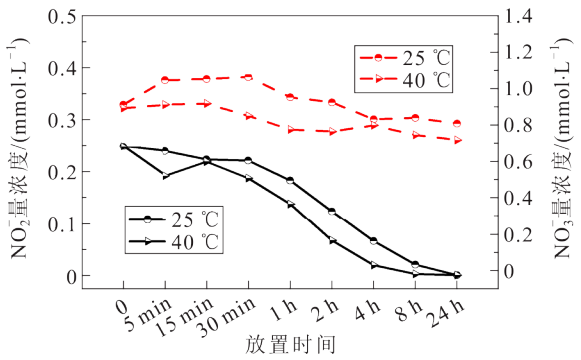



图 8　不同温度(25 ℃和 40 ℃)下等离子体活化水中 $NO_x^-$ 浓度随放置时间的变化

Fig.8　$NO_x^-$ concentration in plasma-activated water as a function of time at different temperatures(25 ℃ and 40 ℃)

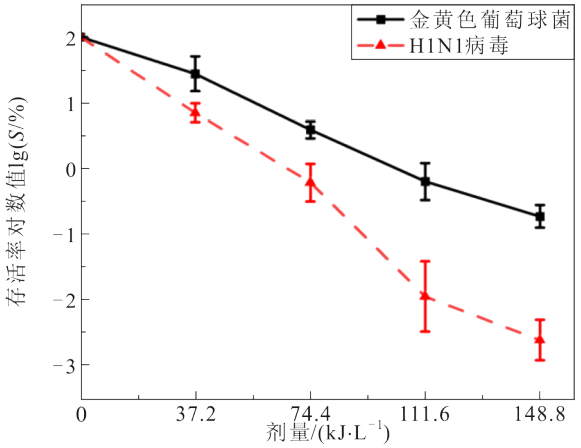



图 9　微生物存活率变化

Fig.9　Variation of microbial survival

出了在不同储存温度(25 ℃和 40 ℃)条件下，放电 15 min 后活化水中 $NO_2^-$ 和 $NO_3^-$ 浓度随放置时间的变化。结果表明，放电 15 min 结束后，在 2 种温度条件下，$NO_2^-$ 浓度均随放置时间持续降低。其中，在 40 ℃条件下，$NO_2^-$ 在数小时内迅速下降并接近检测下限。相比之下，$NO_3^-$ 在放置过程中保持在相对稳定的浓度范围内，其变化幅度显著小于 $NO_2^-$。上述结果表明，PAW 中 $NO_2^-$ 的稳定性对储存时间和温度高度敏感，而 $NO_3^-$ 则具有更高的热稳定性，是放电后长期存在的主要含氮物种。

### 2.3　PAWM 杀菌消毒试验

采用微气泡辅助液相放电等离子体装置分别对 40 mL 去离子水放电处理 5、10、15 和 20 min，对应消毒剂量 $D$ 分别为 37.2、74.4、111.6 和 148.8 kJ/L，随后经雾化器雾化制备 PAWM，作用于金黄色葡萄球菌和 H1N1 病毒 60 min。2 种微生物经 PAWM 处理后的存活情况如图 9 所示，纵坐标为存活率的对数，即 lg($S$/%)，其中 $S$ 为微生物存活率。可以看出，随着放电时间和消毒剂量的增加，PAWM 对 2 种病原微生物的灭活效果逐渐增强。当 $D$ 为 148.8 kJ/L 时，PAWM 对金黄色葡萄球菌和 H1N1 病毒的平均杀灭率分别达到 99.8%和 99.99%。

放电过程中生成的活性氮物种和活性氧物种可进一步发生耦合反应，比如 $NO_2^-$ 和 $H_2O_2$ 反应生成 $ONOO^-$ 等强氧化性粒子，其可在液体介质中维持数小时[28]，当 PAWM 作用于微生物表面时，这些活性物种可以破坏微生物的细胞膜或病毒衣壳结构，并对其胞内蛋白质造成氧化损伤，使蛋白质发生断裂或转化为蛋白质羰基和羟基衍生物等中间体[29-32]，从而可能导致细胞内关键酶的失活及其他生物靶标的氧化损伤。随着放电时间延长，PAWM 中活性物种浓度增加，同时酸性环境逐渐增强，两者的协同作用进一步提高了杀菌效率。

为进一步探究 PAWM 对细菌细胞结构的影响，采用 $D$ 为 148.8 kJ/L 的 PAWM 处理金黄色葡萄球菌，并检测处理后菌悬液上清液中 $K^+$、DNA 及蛋

白质的含量变化，结果如图 10 所示。图中 $P$ 表示与对照组相比的统计学显著性水平，$P$<0.05 表示差异具有统计学意义。与去离子水喷雾处理的对照组相比，经 PAWM 处理后，上清液中 $K^+$、DNA 和蛋白质的外泄量均显著增加($P$<0.05)，表明 PAWM 可破坏细菌细胞膜完整性，引起胞内物质外泄，从而使细菌失去活性。

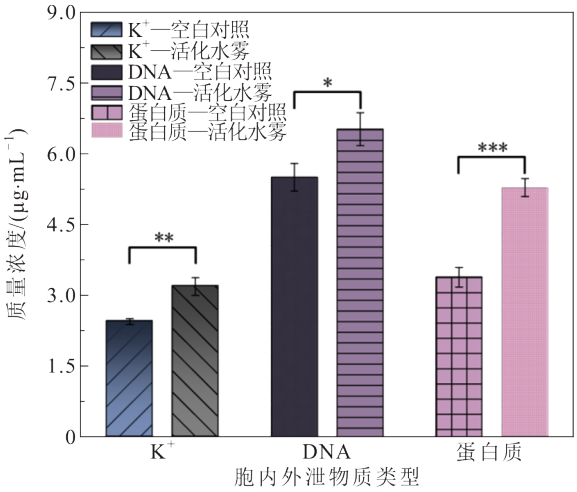



图 10 金黄色葡萄球菌外泄物质浓度(*：$P$<0.05；**：$P$<0.01；***：$P$<0.005)

Fig.10 Staphylococcus aureus exudate concentration (*: $P$<0.05; **: $P$<0.01; ***: $P$<0.005)

## 2.4 金属残留测试

采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)对 PAWM 中的金属元素含量进行检测，结果如图 11 所示。PAWM 中检测到 Fe、Cr、Ni、Mn、Cu、Mo、Ti、Nb 和 Ta 等多种金属元素，不同元素的检出浓度存在明显差异。结果表明，PAWM 中金属元素的相对含量与不锈钢电极中各元素的组成比例具有一致性趋势。其中，Fe、Cr 和 Ni 等在不锈钢中含量较高的合金元素，其在 PAWM 中的检出浓度亦相对较高，而 Ti、Nb 和 Ta 等低含量元素的检出浓度较低，说明PAWM中的金属主要来源于不锈钢电极材料。

同时，不同放电时间条件下的结果显示，随着放电时间由 5 min 延长至 15 min，各金属元素的检出浓度整体呈上升趋势，说明在持续放电过程中电极表面的金属释放行为逐渐增强。此外，结合各金属的第一电离能可以发现，第一电离能较低的元素在 PAWM 中的检出浓度相对较高，说明金属释放行为除受合金组成影响外，还可能与其电离特性有关。

## 2.5 金属腐蚀性评估

不同放电时间制备的 PAW 对不锈钢、碳钢、铜和铝这 4 种金属材料的腐蚀性检测结果如表 3 所示。结果表明，放电 5 min 制备的 PAW 样品对不锈钢和铝金属无腐蚀作用，对碳钢和铜片呈轻度腐蚀作用。随着放电时间的延长至 15 min，溶液中活性物种浓度增加及酸性程度进一步增强，各类金属的腐蚀速率整体呈上升趋势，其中，不锈钢在不同放电时间条件下均表现为无明显腐蚀，而铜和铝由无或轻度腐蚀转变为轻度腐蚀。相比之下，碳钢对 PAW 的腐蚀最为敏感。当放电时间为 15 min 时，其腐蚀速率显著高于其他金属材料，腐蚀等级达到中度腐蚀。这一差异可能与碳钢耐腐蚀性能较弱以及活化水中酸性环境和氧化性物种的协同作用有关。

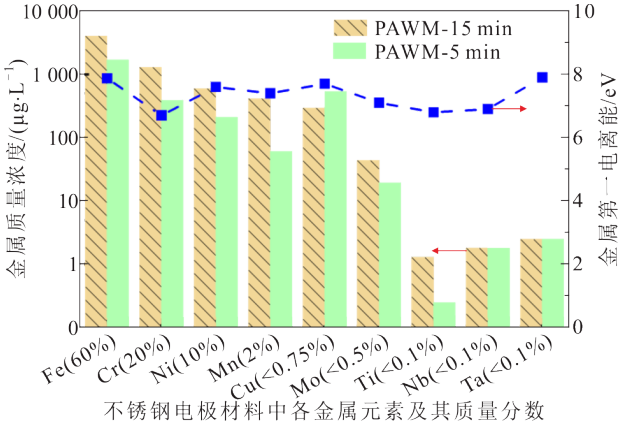



图 11 不同放电时间下等离子体活化水雾中金属元素检出浓度

Fig.11 Detected concentrations of metal elements in plasma-activated water and mist under different discharge times

表 3 金属腐蚀速率

Table 3 Corrosion rate of metals

| PAW 处理时长/min | 不锈钢 | | 碳钢 | | 铜 | | 铝 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $R$ | 等级 | $R$ | 等级 | $R$ | 等级 | $R$ | 等级 |
| 5 | 0 | 无腐蚀 | 0.086 5 | 轻度腐蚀 | 0.037 0 | 轻度腐蚀 | 0.009 2 | 无腐蚀 |
| 15 | 0.001 1 | 无腐蚀 | 0.185 2 | 中度腐蚀 | 0.061 1 | 轻度腐蚀 | 0.023 0 | 轻度腐蚀 |

## 2.6 生物安全性评估

1）细胞毒性试验

为评估 PAWM 的生物安全性，通过对比不同放电时间制备的 PAW 对小鼠 L929 细胞的活性的影响，结果如图 12 所示。与去离子水处理的对照组相比，经 PAW 处理的各组细胞活性均有所下降，差异均具有统计学意义($P$<0.05)。随着放电时间及对应消毒剂量的增加，L929 细胞活性呈现一定程度的下降趋势，但在最高剂量条件下细胞活性仍保持在

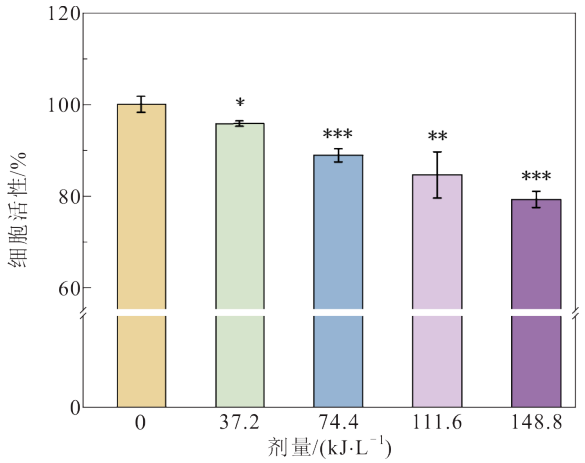



图 12　细胞活性变化(*：$P$<0.05；**：$P$<0.01；***：$P$<0.005)

Fig.12　Changes in cell activity(*：$P$<0.05；**：$P$<0.01；***：$P$<0.005)

80%以上。结果表明，不同放电时间制备的 PAW 对 L929 细胞表现出一定的剂量依赖性细胞毒性，但整体毒性水平较低，仍处于可接受范围内。

2）皮肤刺激试验和急性眼刺激试验

小鼠的皮肤刺激试验及白兔急性眼刺激试验的评分结果分别见表 4 和表 5。在观察时间范围内，经 PAWM 处理的小鼠皮肤未出现红斑、水肿等刺激性反应，各项评分均为 0 分。白兔眼刺激试验中，角膜、虹膜和结膜在观察的时间段内的各项反应评分也均为 0 分，未出现异常情况，这说明白兔眼球在短期接触 PAWM 的条件下无明显刺激作用。上述结果说明，在本试验条件下，PAWM 对皮肤和眼组织均未表现出明显刺激性。

3）急性吸入毒性试验

小鼠急性吸入毒性试验结果如表 6 所示。在 10 000 mg/m$^3$ 的 PAWM 染毒质量浓度下连续吸入 2 h 后，雌雄小鼠在 14 d 观察期内均未出现死亡或明显中毒症状。观察期间，小鼠整体状态良好，体重随时间逐渐增加，未出现体重下降等异常情况。根据动物存活情况及体重变化结果，可判定 PAWM 的急性吸入半数致死质量浓度($LC_{50}$)大于 10 000 mg/m$^3$，表明其在吸入暴露条件下未表现出明显毒性作用。

综上所述，基于微气泡辅助液相放电制备的等离子体活化水雾在杀菌消毒方面表现出良好的有效性与生物安全性，为等离子体液相技术在消毒领域的应用提供了试验依据。未来研究仍须进一步开展以下工作：通过原位诊断或淬灭试验，对短寿命与长寿命活性物种在杀菌过程中的协同作用进行更定量的分析；通过优化电极结构和放电参数，实现活性物种生成与传质过程的精细调控；进一步拓展在不同水质条件、复杂表面及多种微生物体系下的适用性研究，以推动等离子体活化水雾技术的机理完善与工程化应用。

表 4　小鼠皮肤刺激反应评分

Table 4　Mouse skin irritation response scores

| 试验编号 | 1 h 皮肤刺激反应评分 | | 24 h 皮肤刺激反应评分 | | 48 h 皮肤刺激反应评分 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 红斑 | 水肿 | 红斑 | 水肿 | 红斑 | 水肿 |
| 1 号 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 号 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 号 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 5　白兔眼刺激反应评分

Table 5　Scores of white rabbit eye irritation response

| 试验编号 | 1 h 眼刺激反应评分 | | | | 24 h 眼刺激反应评分 | | | | 48 h 眼刺激反应评分 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 角膜 | 虹膜 | 结膜充血 | 结膜水肿 | 角膜 | 虹膜 | 结膜充血 | 结膜水肿 | 角膜 | 虹膜 | 结膜充血 | 结膜水肿 |
| 1 号 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 号 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 号 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 6　急性吸入毒性试验动物存活情况及动物体重变化数据

Table 6　Animal survival and animal weight change data in acute inhalation toxicity tests

| 性别 | 动物数/只 | 存活动物数/只 | 试验前 10 只动物体重变化/g | 第 7 天 10 只动物体重变化/g | 第 14 天 10 只动物体重变化/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 雌 | 10 | 10 | 19.70±1.07 | 23.40±1.07 | 27.50±0.85 |
| 雄 | 10 | 10 | 20.70±0.95 | 26.80±0.79 | 32.90±1.45 |

## 3　结论

1）基于微气泡辅助液相纳秒脉冲放电方式可稳定制备等离子体活化水。放电过程中产生的活性氮物种随放电时间持续积累，其中 $NO_2^-$ 主要作为过渡性产物存在，而 $NO_3^-$ 为活化水中长期稳定存在的主要含氮物种，活化水呈现明显酸性特征。

2）PAWM 对金黄色葡萄球菌和 H1N1 病毒均表现出显著的灭活效果，且杀菌效率随放电时间和消毒剂量的增加而提高。高剂量条件下，PAWM 对 2 种病原微生物的杀灭率分别可达到 99.8%和 99.99%，其杀菌作用与活性物种诱导的细胞膜或病

毒衣壳结构破坏密切相关。

3）放电过程中电极材料中的金属元素可向活化水雾中迁移，其含量随放电时间延长而增加。不同金属材料对活化水的腐蚀行为存在明显差异，其中碳钢对活化水的腐蚀最为敏感，而不锈钢表现出较好的耐腐蚀性能。

4）在本研究条件下，PAWM 对 L929 细胞未表现出明显毒性作用，小鼠皮肤及家兔眼刺激反应均为阴性，小鼠急性吸入半数致死浓度高于测试上限，表明 PAWM 在实现高效杀菌消毒的同时具有较好的生物安全性。

## 参考文献 References


[1] 贾增芹，李克迪．电离辐照杀菌对食品包装材料性能的影响[J]. 食品与机械，2012，28(6)：246-250.
JIA Zengqin, LI Kedi. Effects of ionizing irradiation sterilization on the food packaging materials[J]. Food & Machinery, 2012, 28(6): 246-250.

[2] 邵子轩，费春楠，魏秋华．222 nm 紫外线消毒机制和安全性的研究进展[J]．中国消毒学杂志，2023，40(8)：612-616.
SHAO Zixuan, FEI Chunnan, WEI Qiuhua. Research progress on the mechanism and safety of 222 nm ultraviolet disinfection[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2023, 40(8): 612-616.

[3] 陈旻，张靖垚，张基珅，等．等离子体冷链消杀技术研究进展[J]．高电压技术，2025，51(6)：2872-2882.
CHEN Min, ZHANG Jingyao, ZHANG Jishen, et al. Research progress of plasma cold-chain disinfection and sterilization technology[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2872-2882.

[4] 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.

[5] 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]．高电压技术，2025，51(6)：2830-2849.
SHAO Tao, DOU Liguang, ZHANG Shuai, et al. Applications of plasma technology for microbial inactivation and environmental disinfection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2830-2849.

[6] 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.

[7] HU X, ZHANG Y, WU R A, et al. Diagnostic analysis of reactive species in plasma-activated water (PAW): current advances and outlooks[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(2): 023002.

[8] 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.

[9] EL SHAER M, ZAKI A, REDA A M, et al. Effect of plasma activated mist on breast cancer cells[J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2018, 2(2): 103-108.

[10] UPADRASTA A, DANIELS S, THOMPSON T P, et al. *In situ* generation of cold atmospheric plasma-activated mist and its biocidal activity against surrogate viruses for COVID-19[J]. Journal of Applied Microbiology, 2023, 134(8): lxad181.

[11] EL SHAER M, ABDEL-AZIM M, EL-WELILY H, et al. Effects of DBD direct air plasma and gliding arc indirect plasma activated mist on germination, and physiological parameters of rice seed[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2023, 43(5): 1169-1193.

[12] TAN J Z, KARWE M V. Inactivation of Enterobacter aerogenes on the surfaces of fresh-cut purple lettuce, kale, and baby spinach leaves using plasma activated mist (PAM)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102868.

[13] 许桂敏，王婧昕，刘进仁，等．低温等离子体射流对食品接触材料表面细菌灭活效率的影响[J]．高电压技术，2025，51(6)：2883-2891.
XU Guimin, WANG Jingxin, LIU Jinren, et al. Effect of low temperature plasma jet on bacteria inactivation efficiency of food contact materials surface[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2883-2891.

[14] NUNNALLY W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(4): 1262-1267.

[15] EL SHAER M, FAYED H, EL-HADY H I A, et al. Impact of direct plasma jet and indirect plasma activated mist on surface properties of different material samples during bacterial inactivation[J]. Plasma Medicine, 2022, 12(3): 23-40.

[16] 庞波伦，高钰婷，刘志杰．等离子体活化水中 pH 介导调控实现化学活性高效储存及抗癌效应[J]．高电压技术，2025，51(6)：2914-2924.
PANG Bolun, GAO Yuting, LIU Zhijie. pH-mediated regulation of plasma-activated water for efficient chemical activity storage and anticancer effect[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2914-2924.

[17] 邝勇，章程，胡修翠，等．纳秒脉冲液相放电耦合微气泡固氮影响因素分析[J]．电工技术学报，2023，38(15)：3960-3971.
KUANG Yong, ZHANG Cheng, HU Xiucui, et al. Factors influencing nitrogen fixation by microbubbles coupled with nanosecond-pulse liquid phase discharges[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3960-3971.

[18] GUO L, NIYAZI G, HUANG L L, et al. Inactivation effects of the mist nebulized with plasma-activated air on Pseudomonas aeruginosa through the simulated respiratory tract[J]. Plasma Processes and Polymers, 2023, 20(9): e2200204.

[19] KLASEBOER E, MANICA R, HENDRIX M H W, et al. A force balance model for the motion, impact, and bounce of bubbles[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(9): 092101.

[20] PANOV V A, VASILYAK L M, VETCHININ S P, et al. Pulsed electrical breakdown of conductive water with air bubbles[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28(8): 085019.

[21] QIAO C Y, YANG D L, MAO X H, et al. Recent advances in bubble-based technologies: underlying interaction mechanisms and applications[J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8(1): 011315.

[22] ZHANG T Q, ZHOU R W, WANG P Y, et al. Degradation of cefixime antibiotic in water by atmospheric plasma bubbles: performance, degradation pathways and toxicity evaluation[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 127730.

[23] LIU Z J, GAO Y T, PANG B L, et al. Comparison of the physicochemical properties and inactivation against tumor cells of PAW induced by underwater single-hole and multi-hole bubble plasma[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(29): 295202.

[24] 杨焓，姜楠，孙浩洋，等. 覆碳布增强降膜 DBD 等离子体制备活化水研究[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2925-2933.
YANG Han, JIANG Nan, SUN Haoyang, et al. Study on the preparation of activated water by carbon cloth-covered reinforced falling film DBD plasma[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2925-2933.

[25] HE J J, ORTIZ S, ATTRI S, et al. Comparing inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 on fresh produce using plasma-activated mist[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 93: 103634.

[26] OH J S, SZILI E J, GAUR N, et al. How to assess the plasma delivery of RONS into tissue fluid and tissue[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(30): 304005.

[27] 郭凯航，章程，孙建涛，等. 基于发射光谱的绝缘油中放电参数时间演化特性[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3191-3198.
GUO Kaihang, ZHANG Cheng, SUN Jiantao, et al. Temporal evolution characteristics of discharge parameters in insulating oil based on optical emission spectra[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3191-3198.

[28] YAO Q H, XU H B, ZHUANG J, et al. Inhibition of fungal growth and aflatoxin $B_1$ synthesis in Aspergillus flavus by plasma-activated water[J]. Foods, 2023, 12(13): 2490.

[29] BACELLAR I O L, OLIVEIRA M C, DANTAS L S, et al. Photosensitized membrane permeabilization requires contact-dependent reactions between photosensitizer and lipids[J]. Journal of the American Chemical Society, 2018, 140(30): 9606-9615.

[30] BACELLAR I O L, PAVANI C, SALES E M, et al. Membrane damage efficiency of phenothiazinium photosensitizers[J]. Photochemistry and Photobiology, 2014, 90(4): 801-813.

[31] PHAM T C, NGUYEN V N, CHOI Y, et al. Recent strategies to develop innovative photosensitizers for enhanced photodynamic therapy[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(21): 13454-13619.

[32] YUAN H, LI P H, BAO H F, et al. Engineering viable foot-and-mouth disease viruses with increased acid stability facilitate the development of improved vaccines[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104(4): 1683-1694.



**张子硕**
2001—，男，硕士生
主要从事等离子体活化水雾产生及其消毒灭菌作用机制研究
E-mail: zhangzishuo@mail.iee.ac.cn

ZHANG Zishuo



**张　帅**(通信作者)
1988—，男，博士，副研究员，硕导
主要从事脉冲放电等离子体技术及其在能源转化、生物安全领域应用研究
E-mail: zhangshuai@mail.iee.ac.cn

ZHANG Shuai
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-11-28　修回日期　2026-02-26　　编辑　曾文君