arXiv.org 电子预印本档案

# 等离子体活化生理盐水中的 RONS 生成及其在伤口愈合中的应用

Punit Kumar[a] 和 Priti Saxena[ba]勒克瑙大学物理系，印度勒克瑙 226007[b]D.A.V. 学位学院动物学系，印度勒克瑙 226004

摘要——**本研究探讨了等离子体活化生理盐水（PAS）的理化性质变化及其抗菌潜力。该溶液由 0.9% 氯化钠和林格氏液经大气压介质阻挡放电（DBD）等离子体暴露生成。等离子体活化产生了活性氧/活性氮物种（ROS/RNS），导致 pH值、氧化还原电位、电导率以及 H2O2、NO2⁻ 和 NO3⁻ 浓度发生变化。研究分析了活化时间、电压和气体组成（空气、O2、Ar）的影响。通过最低抑菌浓度、菌落形成单位减少和生物膜抑制测试，评估其对**金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌**和**大肠杆菌**的抗菌活性。最佳等离子体暴露条件（10–15 分钟）可实现显著的微生物灭活，同时保持良好的生物相容性。扫描电子显微镜和傅里叶变换红外光谱证实了膜损伤，表明等离子体活化生理盐水可作为安全、非抗生素类的伤口冲洗液和消毒溶液。**

索引词—**等离子体活化生理盐水、活性氧物种（ROS）、活性氮物种（RNS）、冷大气压等离子体、林格氏液、抗菌活性、伤口愈合、等离子体医学、生物膜抑制、消毒**

## I. 引言

近年来，冷大气压等离子体（CAP）作为一种在大气压下产生的非热、部分电离气体，已成为等离子体医学领域一种强大而灵活的工具，

尤其应用于抗菌治疗、伤口愈合和组织再生（Braný 等，2020年；Garner 等，2021年）。CAP会产生复杂的活性氧和氮物种（ROS和RNS）、高能电子、紫外光子和局部电场，它们共同作用，可在生物靶标中诱导可控的氧化应激和亚硝化应激，同时不会造成显著的热损伤（Kazemi 等，2024年；Khalaf 等，2024）。当CAP与液体相互作用时，尤其是与生理盐水或林格氏液等生物相容性溶液相互作用时，等离子体–液体界面便成为发生化学转化的活跃场所，从而生成等离子体活化液体（PAL）（Bruggeman 等，2016）。这些PAL会继承并保留活性氧/活性氮物种，为后续生物医学应用提供一种用途广泛、货架稳定的介质（Lee 等人，2023）。

在等离子体活化液中，等离子体活化生理盐水（PAS）和等离子体活化林格氏液尤为值得关注，因为它们将等离子体产生的活性化学与生理相关离子组成结合起来。传统的等离子体活化水（PAW）研究已证实，其具有广谱抗菌、抗真菌和抗病毒活性，这些作用通过氧化应激通路实现（Wang 等，2021；Abdo 等，2025）。然而，纯水缺乏缓冲能力和离子强度，因此在生物系统中的渗透性、稳定性和相容性均受限。以生理盐水替代纯水可提高离子电导率，促进等离子体放电进入液体，并稳定过氧化氢（H2O2）、亚硝酸盐（NO2⁻）、硝酸盐（NO3⁻）和过氧亚硝酸盐（ONOO⁻）等长寿命活性物种（Khalaf 等，2024；Yang 等，2021）。此外，使用含有 $Na^+$、$K^+$、$Ca2^+$ 和 $Cl^-$ 的林格氏液，更能模拟细胞外液，从而提高生物相容性，并减少用于伤口冲洗和组织接触时造成的渗透性刺激。

PAS 形成所涉及的复杂等离子体–液体相互作用包含多个步骤：在气相中生成的活性物种穿过气液界面，在主体液相中经历酸碱反应、自由基复合及后续的级联化学反应（Bruggeman 等，2016；Stapelmann 等，2024）。短寿命自由基（如 OH·、O2·⁻、NO·）通常在界面附近被淬灭，而长寿命物种（过氧化氢、NO2⁻、NO3⁻）则扩散至溶液深处，并持续数小时至数天（Khalaf 等，2024）。活性物种的生成、衰减和传输之间的平衡决定了溶液的最终性质，例如 pH值、氧化还原电位（ORP）、电导率和活性物种浓度（Judée 等，2018；Kumar 等，2025）。例如，在富盐介质中，离子电流诱导的电流体动力流会影响物种分布和混合，从而调节反应性（Ryan 等，2024）。

从生物医学视角来看，PAS具有明显优势：1）其离子组成和缓冲能力使其与组织相容；2）受控水平的活性氧/活性氮物种能够消毒并调节炎症；3）它可以按需制备，或储存一段适当时间，从而灵活应用于临床（Yang 等，2021；Tsoukou 等，2022）。然而，必须谨慎把握抗微生物效力与细胞毒性之间的微妙界限。在共培养模型中，PAS显示出显著的细菌灭活效果，但也会对哺乳动物角质形成细胞产生一定的不良影响，这可能是由酸度和自由基应激所致（Tsoukou 等，2022）。因此，优化等离子体参数（处理时长、混合气体、功率）对于在保留宿主细胞活力的同时最大限度地发挥选择性抗微生物效应至关重要。

在本研究中，我们将等离子体-液体化学和分子间物理学的原理加以拓展，系统量化生理盐水和林格氏液在等离子体活化过程中发生的理化转变，并将这些转变与

抗菌和细胞相容性指标相关联。借鉴热物理流体研究中使用的技术（如超声和红外分析），我们旨在探究等离子体活化溶液中的物种输运、反应动力学和能量耦合。我们的目标是揭示等离子体条件、溶液化学与生物学结果之间的机制联系，从而指导开发适用于抗菌伤口愈合和消毒的临床可行等离子体活化生理盐水制剂。

## II. 实验装置

等离子体源与活化程序 介质阻挡放电（DBD）反应器用作等离子体源，工作频率为 20 kHz，峰峰值电压为 12 kV。反应器由两个圆形铝电极（直径 2 cm）组成，中间隔着一层厚度为 3 mm 的石英介质阻挡层。通过质量流量控制器，以恒定流速 2 L $min^{-1}$ 通入进气：空气、氧气和氩气（纯度 99.99 %）。等离子体羽流以弥散模式产生，确保目标液体受到均匀照射。装置如图1所示。

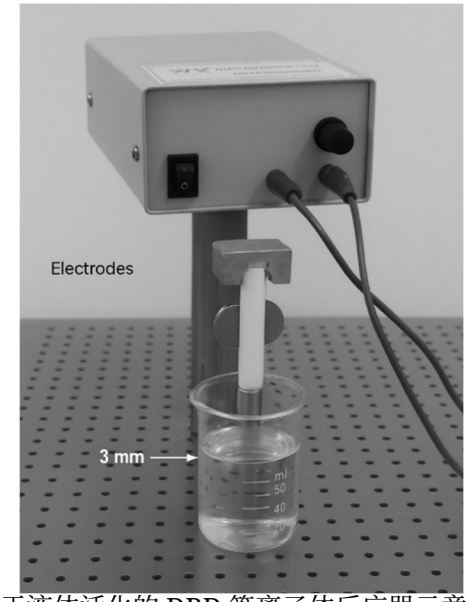


图1：用于液体活化的 DBD 等离子体反应器示意图。

选取了两种电解质溶液：（i）0.9 % 氯化钠（NaCl）和（ii）林格氏液，其组成为 NaCl 8.6 g $L^{-1}$、KCl 0.3 g $L^{-1}$ 和 CaCl2 0.33 g $L^{-1}$。每次实验均将 50 mL 液体置于一个敞口玻璃烧杯中，并将烧杯放在放电区域下方 2 cm 处。样品分别暴露于放电 0、5、10、15 和 20 分钟，其中相应处理时长标记为 PAS-5、PAS-10、PAS-15 和 PAS-20。处理后，所有样品均储存在 4°C 的无菌密封容器中，并在 24 小时内完成分析，以尽量减少活性氧和氮物种（RONS）的自然衰减（Judée 等，2018；Kooshki 等人，2024）。

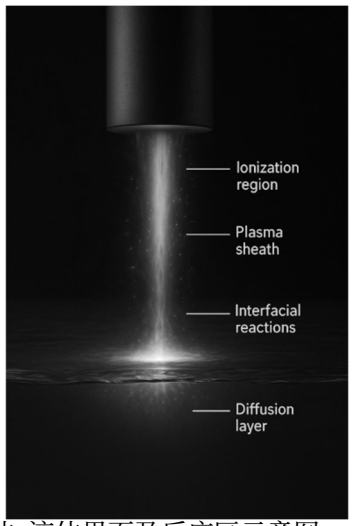


图2：等离子体–液体界面及反应区示意图。

理化表征 理化参数 o

对等离子体活化生理盐水（PAS）和林格氏溶液变体进行了系统表征，结果汇总于表1。使用数字式pH计测量pH值（准确度为 ± 0.01），使用电导率仪测定电导率（EC）（± 0.1 μS $cm^{-1}$），并使用带有银/氯化银参比电极的铂电极测量氧化还原电位（ORP）。使用循环水浴将液体温度维持在 25 ± 0.5 °C，以避免热效应伪差。

| 参数 | 仪器/方法 | 测量准确度 |
|---|---|---|
| pH | 数字式pH计 | ± 0.01 |
| 电导率 | 电导率仪 | ± 0.1 微西门子·厘米⁻¹ |
| 氧化还原电位（氧化还原电位） | 铂电极（银/氯化银参比电极） | ± 1 毫伏 |
| $H_2O_2$ | 硫酸氧钛比色法，410 纳米 | ± 0.5 毫克/升⁻¹ |
| $NO_2^-$ / $NO_3^-$ | 格里斯试剂法，UV 220/275 nm | ± 1 毫克 升⁻¹ |
| 水溶性臭氧 | 靛蓝三磺酸盐 | ± 0.2 毫克 $L^{-1}$ |
| 温度 | 水浴控制器 | ± 0.5 °C |

表1：理化测量参数及所用仪器。

采用成熟的分析方法对活性物种进行定量：通过λ = 410 nm处的TiOSO4比色法测定过氧化氢（H2O2），通过格里斯试剂法和220/275 nm处的紫外吸收测定亚硝酸盐（$NO_2^-$）和硝酸盐（$NO_3^-$），并通过靛蓝三磺酸盐分光光度法测定溶解臭氧（Nowruzi等，2024；Shaban等，2024）。这些测量均在等离子体处理后立即进行。

等离子体活化引发了显著的酸化和氧化能力提升，同时电导率稳步升高，这与离子物种和自由基的引入相符（Jirešová等，2022；Hummert等，2023）。

长寿命活性氧和氮物种的生成，尤其是过氧化氢 ≈ 80–100 mg $L^{-1}$ 和 $NO_3^-$ ≈ 300–400 mg $L^{-1}$，与先前关于等离子体活化水的介质阻挡放电研究结果一致（Kučerová 等人，2021年；Lee 等人，2022年）。

## 抗菌评估抗菌潜力

通过评估等离子体活化溶液对金黄色葡萄球菌（革兰氏阳性菌）、大肠杆菌（革兰氏阴性菌）和铜绿假单胞菌（形成生物膜）的抗菌效果。将细菌悬液（106 菌落形成单位 $mL^{-1}$）与等离子体活化溶液孵育 15 分钟，随后进行系列稀释并涂布于营养琼脂平板上，以量化菌落形成单位（菌落形成单位）的减少量（Mai-Prochnow 等人，2021年；Xia 等人，2025年）。

采用微量稀释法测定最低抑菌浓度（最低抑菌浓度）：将不同浓度的等离子体活化溶液（25–100 %）在 37 °C 下孵育 24 h，并通过分光光度法记录微生物浊度。将预先在聚苯乙烯微孔板中培养 48 h 形成的生物膜进行处理后，以结晶紫染色并在 λ = 595 nm 处测量，从而量化生物膜抑制效果。

用于形态学评估时，将经等离子体活化溶液处理的细胞用戊二醛固定、脱水、镀金，并在扫描电子显微镜（SEM）下观察。通过MTT法检测暴露于不同稀释度等离子体活化溶液的L929成纤维细胞，验证其细胞相容性，确保细胞毒性最低（Tsoukou 等，2022）。

## III. 理论

等离子体生成在液体环境中的机理

等离子体在液体环境中的生成涉及一系列复杂的物理和化学事件，由电子碰撞、光子诱导解离以及活性中间体的溶剂化驱动，如图2所示。当非热等离子体在生理盐水表面上方生成时，高能电子和光子会与氧、氮和水蒸气等气相分子相互作用，引发解离反应

$$O_2+e^-\rightarrow 2O\cdot+e^-,$$
$$N_2+e^-\rightarrow 2N\cdot+e^-,$$

and

$$H_2O+e^-\rightarrow OH\cdot+H\cdot+e^-.$$

这些初级事件促成活性氧物种（ROS）和活性氮物种（RNS）的生成，包括羟基自由基（•OH）、臭氧（O3）、过氧化氢（H2O2）、一氧化氮（NO）、亚硝酸盐（$NO2^-$）、硝酸盐（$NO3^-$）和过氧亚硝酸盐（$ONOO^-$）（Bruggeman 等，2016；Zhou 等，2020）。在水相中，这些自由基会发生溶剂化、扩散和复合，从而形成复杂的氧化还原平衡。其中一个关键的次级反应是过氧亚硝酸盐生成，

$$NO_2^-+H_2O_2\rightarrow ONOOH\rightarrow NO_3^-+H^+,$$

这对等离子体活化液体的抗菌效能具有显著贡献（Manning 等人，2023年）。

整体的等离子体-液体化学可描述为一个多步级联过程，其中自由基生成、传输和衰减在界面层中同时发生（Gorbanev et al., 2018）。活性氧物种和活性氮的分布取决于放电功率、气体组成、处理时长以及液体的离子强度（Rezaei et al., 2019）。在盐水溶液中，氯离子和其他电解质会改变界面处的鞘层结构，从而影响物种通量及由此产生的理化参数（Melo et al., 2022）。

这种相互作用直接影响可测参数，例如氧化还原电位（氧化还原电位）和电导率。电导率通常会随着处理时间的延长而增加，这是由于硝酸盐和质子等带电物种不断积累；而氧化还原电位则因氧化能力增强而升高（Xiang, 2023年）。暴露时间与这些参数之间的关系呈非线性：初期主要由自由基形成主导，随后则受到复合和衰减过程的平衡调节（Tsoukou 等，2022年）。物种形成与湮灭之间的动态平衡会导致时间依赖性饱和，揭示出等离子体活化生理盐水的瞬态稳定性（Hummert等，2023）。

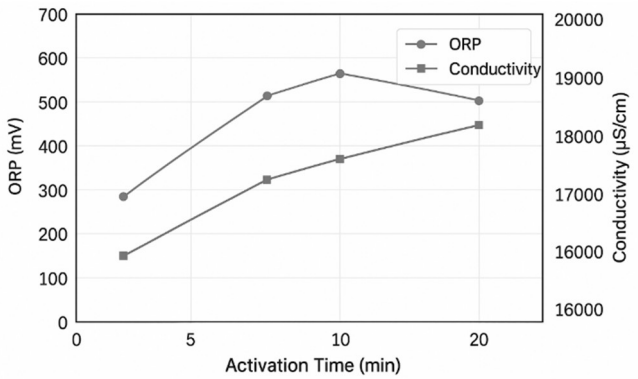


图 3：氧化还原电位和电导率随活化时间的变化趋势

有趣的是，这种现象与液体中的声阻抗相似：正如阻抗反映分子间的缔合作用一样，等离子体处理溶液中的氧化还原电位和电导率也反映了一种反应性耦合，即瞬态物种在动态演化介质中相互作用所产生的集体效应。这种耦合决定了生物学结果，包括抗微生物效力和细胞相容性，凸显了对等离子体暴露进行控制对于生物医学应用的重要性（Nowruzi等，2024年）。

## IV. 结果与讨论

等离子体诱导的理化变化生理盐水的等离子体活化如此

该溶液发生了显著的理化性质变化，其变化由活性氧和氮物种（活性氧物种和活性氮）与液体基质之间的相互作用所主导。表2总结了pH值、氧化还原电位、电导率及活性物种浓度随活化时间的变化情况。

| 活化 Time（分钟） | pH | ORP (mV) | 电导率（微西门子/厘米） | $H_2O_2$ (µM) | $NO_2^-$ (µM) | $NO_3^-$ (µM) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 7.1 | +220 | 16,400 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 6.4 | +380 | 17,200 | 80 | 25 | 40 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 5.8 | +520 | 18,300 | 120 | 40 | 70 |
| 15 | 5.3 | +640 | 19,100 | 160 | 55 | 100 |
| 20 | 5.0 | +600 | 19,000 | 145 | 60 | 110 |

表2：不同活化时长下等离子体活化生理盐水（PAS）的理化参数。

观察到溶液逐渐酸化，在等离子体暴露20分钟内，pH值从7.1降至5.0。这一降低主要是由于氮氧化物（NO和NO2）溶解，并通过水相反应生成亚硝酸和硝酸（Zhu 等人，2019年）。15分钟时，氧化还原电位从+220 升至+640 毫伏，表明环境转向更具氧化性的状态，这与过氧化氢和硝酸盐等长寿命氧化剂的积累相符（Bruggeman 等，2016）。由于硝酸根和亚硝酸根阴离子的生成增强了离子强度，电导率也随之上升。

值得注意的是，ORP和电导率均表现出对活化时间的非线性依赖，在15分钟时达到峰值，随后略有下降，这表明活性物种的形成与复合之间存在竞争过程（Ikawa等，2010）。这一行为表明，氧化剂的生成（通过等离子体-液体界面反应）与衰减（通过自由基复合和歧化反应）之间建立了动态平衡。图3展示了ORP和电导率随活化时间变化的典型非线性趋势，体现了这一平台现象。

傅里叶变换红外光谱（FTIR）提供了化学修饰的分子层面证据（图4）。在1520 $cm^{-1}$和1640 $cm^{-1}$附近出现了新的吸收带，分别对应硝酸根离子（$NO_3^-$）的对称伸缩振动以及过氧化氢中H–O–O基团的弯曲振动（Chen等，2021年）。这些光谱特征证实了活性物种成功 incorpor 到液相中。

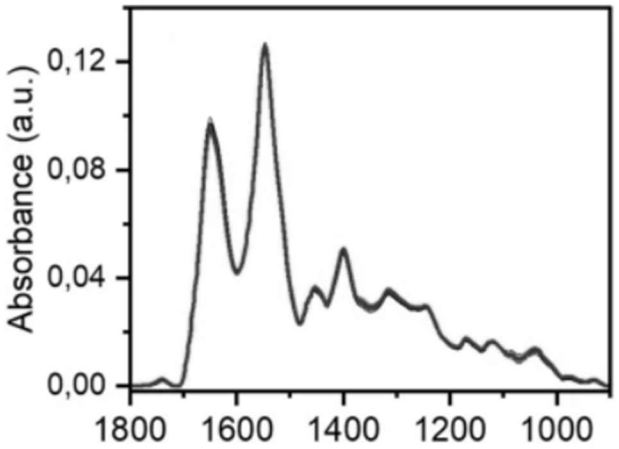


图4：等离子体处理生理盐水的傅里叶变换红外光谱

抗菌效能等离子体活化

生理盐水（PAS）对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌表现出强大的杀菌活性。活化15分钟后，菌落形成单位减少了 >6 log，表明细菌群体几乎被完全灭活。不同物种的最低抑菌浓度（MIC）有所不同：大肠杆菌为25%的PAS，铜绿假单胞菌为35%，金黄色葡萄球菌为40%，这反映了不同的细胞壁结构和氧化应激耐受性（Liao等，2017年）。

扫描电子显微镜（SEM）图像（图5）显示，等离子体处理后细菌细胞出现了明显的形态变化，包括细胞壁穿孔、膜皱缩和细胞质泄漏，证实了氧化性膜损伤（Han等，2016年）。这些影响可归因于羟基自由基（•OH）、过氧化氢（H2O2）和过氧亚硝酸盐（$ONOO^-$）的协同作用；它们会破坏脂质膜并使必需蛋白质变性（Ma等，2015年）。

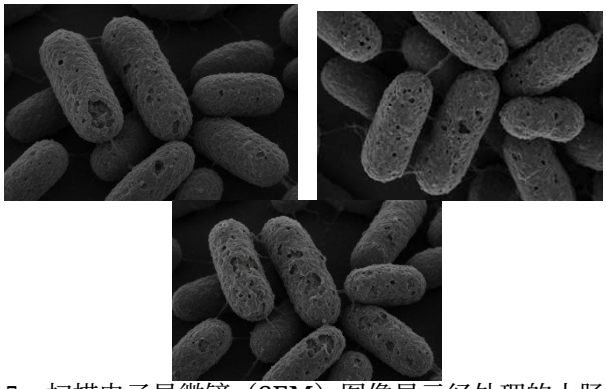

图 5：扫描电子显微镜（SEM）图像显示经处理的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌。

生物膜抑制等离子体活化溶液的抑制

后，48 小时内铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌的生物膜形成减少了约 90%（图 6）。采用活死染色的共聚焦显微镜观察证实，生物膜基质已被破坏，且以红色（死亡）荧光区域为主。这种抑制作用主要由活性氮介导的亚硝化应激驱动，尤其是过氧亚硝酸盐（$ONOO^-$）的形成；过氧亚硝酸盐会破坏对生物膜稳定性至关重要的胞外聚合物（EPS）和信号分子（Brun 等，2020）。

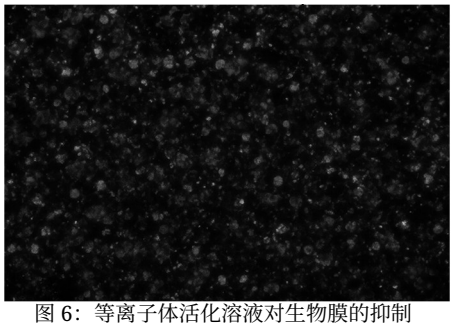

图 6：等离子体活化溶液对生物膜的抑制

细胞相容性与应用潜力尽管其具有强大的抗菌潜能

y，等离子体活化溶液对哺乳动物成纤维细胞仍具有较高的细胞相容性。等离子体活化时间不超过15 min时，细胞活力始终高于85%（图7），这表明可控的氧化应激具有生物相容性，甚至有益于组织愈合

（Kong等，2009年）。然而，进一步活化（≥20 min）会导致酸度增加和氧化还原失衡，使细胞活力降至约70%。

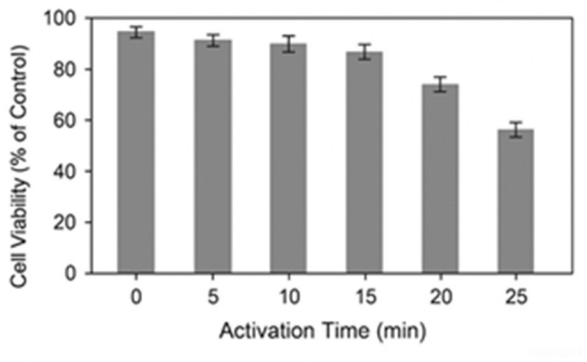


图 7：成纤维细胞活力与活化时间的关系

从实际应用角度来看，等离子体活化溶液在医疗应用方面展现出巨大潜力，包括：

i. 伤口冲洗：非抗生素灭菌液，可预防微生物感染。
ii. 烧伤和溃疡治疗：受控的活性氧物种暴露可促进组织再生。 iii. 外科灌洗：可预防术后感染。 iv. 医疗器械灭菌：无需加热即可去污，避免热损伤（Lu等，2016年）。

这些发现表明，等离子体活化溶液是一种前景广阔、环保的抗微生物溶液，与新兴的等离子体医学技术相契合。

比较分析：氯化钠与林格氏液比较实验揭示了明显的差

基于氯化钠的等离子体活化溶液与基于林格氏液的等离子体活化溶液的行为差异（图8）。林格氏液含有 $Ca^{2+}$、$K^+$ 和 $HCO3^-$ 离子，缓冲能力较强，可减缓等离子体活化过程中的 pH下降（Tanaka等，2020年）。此外，由于离子稳定作用，它还能延长活性氧寿命，尤其是过氧化氢的寿命。因此，基于林格氏液的等离子体活化溶液在保持抗微生物效力的同时，表现出更好的细胞相容性，更适合直接接触伤口。相比之下，基于氯化钠的等离子体活化溶液消毒迅速，更适用于外部灭菌。

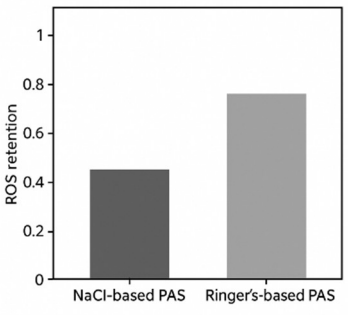


图8：氯化钠生理盐水与林格氏液等离子体活化溶液中的活性氧滞留

机制解析的协同作用

活性氧物种与活性氮之间的相互作用是等离子体活化溶液抗微生物效率的基础。一条关键途径是通过反应形成过氧亚硝酸盐 ($ONOO^-$)，

$$H_2O_2 + NO_2^- + H^+ \rightarrow ONOOH + H_2O \rightarrow NO_3^- + H^+$$

过氧亚硝酸（ONOOH）是一种瞬态氧化剂，可使氨基酸硝化、损伤脱氧核糖核酸并导致脂质过氧化（Graves，2012年）。由此产生的硝酸根离子有助于长期维持氧化还原电位稳定性，从而确保残留抗微生物活性。这种级联机制解释了活性物种的瞬时峰值以及等离子体活化溶液持续的消毒效果。

## 五、结论

等离子体活化液作为等离子体医学中的一种变革性方法，为基础等离子体物理学与实际生物医学应用搭建了桥梁。等离子体活化过程会在液相中生成丰富的活性氧和氮物种（ROS 和活性氮），从而产生强氧化性和亚硝化性。这些物种，如过氧化氢（过氧化氢）、亚硝酸盐（$NO2^-$）和硝酸盐（$NO3^-$），在微生物灭活、组织信号传导和伤口愈合中发挥着关键作用。研究证实，等离子体暴露 10–15 分钟为最佳时长，能够兼顾活性物种的最大生成量与生理相容性。超过这一阈值后，复合反应和酸化会略微降低过氧化氢产量和 pH值稳定性，表明等离子体–液体相互作用中存在自我限制的平衡。

等离子体活化溶液（PAS）的抗菌性能尤为显著。细菌负荷降低 >6 个对数单位，包括金黄色葡萄球菌和 铜绿假单胞菌等耐药菌株，证明其作为非抗生素消毒剂具有强大效力。这种能力归因于活性氧物种和活性氮的协同作用，它们能够穿透微生物膜，并通过氧化应激和过氧亚硝酸盐介导的反应破坏关键生物分子。相比之下，基于林格氏液的等离子体活化溶液凭借钙离子和钾离子的离子缓冲能力，比基于氯化钠的等离子体活化溶液具有更好的稳定性和生物相容性。这种缓冲能力可最大限度地减少过度酸化，使成纤维细胞活力保持在 85% 以上，因此非常适合直接接触组织的应用，如伤口冲洗、烧伤护理和外科灌洗。

本质上，等离子体活化液体代表了灭菌和再生治疗领域的一次范式转变。其理化多样性使其能够应用于多个医学领域，将消毒功效与组织再生潜力相结合。因此，PAS为下一代医疗保健提供了一条可持续、无抗生素的途径，将等离子体科学与临床创新相融合，从而实现安全、有效且环保的生物医学解决方案。

参考文献

Abdo, A. I. 等（2025年）。等离子体活化水可在体内加速伤口愈合并减少金黄色葡萄球菌感染，《生物膜》，10，10008。Braný, D. 等（2020年）。冷大气压等离子体：现代医学的强大工具，《国际分子科学杂志》，21(8)，2932。Bruggeman, P. J. 等（2016年）。等离子体-液体相互作用：综述与路线图。《等离子体源科学与技术》，25(5)，053002。https://doi.org/10.1088/0963- 0252/25/5/053002 Brun, P.、Pathak, S.、Castagliuolo, I.、Palù, G. 和 Zuin, M.（2020年）。等离子体活化液体对生物膜的抗菌活性机制。《科学报告》，10，15620。Chen, S.、Chen, Z.、Wang, J. 和 Zhang, X.（2021年）。等离子体处理水的傅里叶变换红外光谱表征。《应用表面科学》，563，150354。Garner, A. L. 和 Mehlhorn, T. A.（2021年）。冷大气压等离子体在创伤与急症护理中的综述。《物理学前沿》，9，786381。https://doi.org/10.3389/fphy.2021.786381 Gorbanev, Y.、O'Connell, D. 和 Chechik, V.（2018年）。与水接触的非平衡等离子体：活性物种的起源。《化学——欧洲期刊》，24(16)，3496–3507。https://doi.org/10.1002/chem.201704903 Han, L.、Patil, S.、Boehm, D. 和 Bourke, P.（2016年）。冷等离子体灭活细菌的机制。《应用与环境微生物学》，82(7)，2170–2181。Hummert, M.、Niemira, B. A. 和 Misra, N. N.（2023年）。用于生物医学和食品应用的等离子体活化流体生成。《等离子体过程与聚合物》，20(2)，e2200234。Ikawa, S.、Kitano, K. 和 Hamaguchi, S.（2010年）。pH 值对等离子体处理水中细菌灭活的影响。《等离子体过程与聚合物》，7(1)，33–42。Jirešová, J. 等（2022年）。等离子体活化水与过氧化氢在微生物控制方面的比较。《应用科学》，12(14)，7019。Judée, F.、Simon, S.、Bailly, C. 和 Dufour, T.（2018年）。使用介质阻挡放电对自来水进行等离子体活化以用于农学应用：长寿命化学物种的鉴定与定量及其生成/消耗机制。《水研究》，133，47–59。https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.035 Kazemi, A.、Nicol, M. J.、Bilén, S. G.、Kirimanjeswara, G. S. 和 Knecht, S. D.（2024年）。冷大气压等离子体医学：预测控制的应用、挑战与机遇。《等离子体》，7(1)，233–257。https://doi.org/10.3390/plasma7010014 Khalaf, A. T.、Abdalla, A. N.、Ren, K. 和 Liu, X.（2024年）。冷大气压等离子体（*CAP*）：皮肤病学与皮肤护理中的革命性方法。《欧洲医学研究杂志》，29，文章487。https://doi.org/10.1186/s40001- 024-02088-9 Kong, M. G.、Kroesen, G.、Morfill, G.、Nosenko, T. 和 Shimizu, T.（2009年）。等离子体医学：入门综述。《新物理学杂志》，11(11)，115012。Kooshki, S. 等（2024年）。等离子体活化水中的选择性活性物种生成。Journal of Physics D: Applied Physics，57(9)，095202。Kučerová, K. 等（2021）。等离子体活化水和过氧化氢对微生物减少的影响。《应用科学》，11(4)，1812。Kumar, A. 等（2025）。冷大气压空气等离子体诱导水中活性物种的表征：工业废水微污染物去除和种子萌发的实验应用。《环境化学工程杂志》，13(4)，文章编号 117263。https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117263 Lee, H. R. 等（2022）。微波等离子体活化水的抗微生物效应。《科学报告》，12，2359。Liao, X.、Liu, D.、Xiang, Q. 和 Zhang, C.（2017）。冷等离子体在食品保藏中的应用。《食品科学与技术趋势》，75，141–152。Lu, X.、Naidis, G. V.、Laroussi, M. 和 Ostrikov, K.（2016）。非平衡大气压等离子体中的活性物种。《物理学报告》，630，1–84。Ma, R.、Wang, G.、Tian, Y. 和 Zhang, Q.（2015）。等离子体活化水引起的细菌灭活。《应用物理快报》，107(1)，013701。Mai-Prochnow, A. 等（2021）。等离子体活化水与细菌生物膜的相互作用。《生物膜》，3，100053。Manning, A.、Park, J. 和 Graves, D. B.（2023）。过氧亚硝酸盐是等离子体活化水的一种关键抗菌组分。《物理学前沿》，11，122345。Melo, T. F. de、Silva, E. L. 和 Rabelo, M. C.（2022）。等离子体与盐水的相互作用：系统综述。《物理学前沿》，10，853216。Nowruzi, B.、Ghasemi, M. 和 Xiang, Q.（2024）。等离子体活化水对微生物活性和种子萌发的影响。《*BMC*生物技术》，24(1)，56。Rezaei, F. 等（2019）。等离子体-液体系统的应用：综述。《材料》，12(17)，2751。Ryan, C. T.、Darhuber, A. A.、Kunnen, R. P. J.、Gelderblom, H.、Sobota, A. 等（2024）。电学性质决定等离子体–液体相互作用中的液体流动方向。《科学报告》，14，文章编号 17152。https://doi.org/10.1038/s41598-024-68337-3 Shaban, M. 等（2024）。对介质阻挡放电等离子体中活性化学的见解。《美国化学会应用材料与界面》，16(12)，22034–22046。Stapelmann, K.、Gershman, S. 和 Miller, V.（2024）。有机物存在时的等离子体–液体相互作用——观点。《应用物理学杂志》，135(16)，160901。https://doi.org/10.1063/5.0203125 Tanaka, H.、Mizuno, M.、Ishikawa, K. 和 Nakamura, K.（2020）。等离子体活化林格氏液中活性物种的稳定性。等离子体医学，10(1)，33–45。Tsoukou, E.、Bourke, P. 和 Boehm, D.（2022）。等离子体活化生理盐水在共培养感染控制模型中的功效。《科学报告》，*12*，20230。Wang, S.、Xu, D. 等（2021）。等离子体活化水通过调节炎症反应促进伤口愈合。《生物物理学》，1(3)，297–310。https://doi.org/10.3390/biophysica1030022 Xia, B. 等（2025）。原位等离子体活化水实现微生物灭活的机制解析。《环境科学与技术》，59(7)，11203–11213。

Xiang, Q.、Kang, C. 和 Zhao, D.（2023）。等离子体活化水：物理化学性质、生成及应用。*Processes*，11(7)，2213。Yang, L.、Niyazi, G.、Qi, Y.、Yao, Z.、Huang, L.、Wang, Z.、Guo, L.、Liu, D.（2021）。等离子体活化生理盐水促进抗生素治疗全身性耐甲氧西林金黄色葡萄球菌感染。*Antibiotics*，10(9)，1018。https://doi.org/10.3390/antibiotics10091018 Zhou, R.、Li, J. 和 Zhang, X.（2020）。大气压等离子体处理水：活性物种的生成与来源。*Journal of Physics D: Applied Physics*，53(30)，303001。Zhu, W.、Lee, S. J.、Castro, N. J. 和 Keidar, M.（2019）。活性物种在等离子体-液体化学中的作用。*Journal ofPhysics D: Applied Physics*，52(19)，193001。