

低频活化水的灭毒机制研究

段超, 丁进才

七道健康科技研究院, 河南 郑州

Email: dayou@sumanbo.com

收稿日期: 2021年4月21日; 录用日期: 2021年6月4日; 发布日期: 2021年6月23日

摘要

由病原微生物引起的疾病以及使用常规抗菌剂治疗对社会经济、环境和健康的影响是日益增加的。对抗生素的抗药性越来越强,许多普通抗生素对人类健康和免疫系统产生了有害的生物副作用,这促使人们寻找新的成本效益高、效率高的消毒处理方法和对免疫力有改善的方法。低频活化水(等离子体活化水)是冷大气等离子体与水反应的产物,是一种很有科研发展前景的广谱杀菌剂,低频共振装置发射的舒曼低频的7.83赫兹复制大地磁场的频率,舒曼共振与身体健康息息相关,7.83赫兹的舒曼波与人体脑电波及 α 波的频率基本接近,它对提高人体免疫力,辅助改善亚健康,激活细胞等方面有一定作用。低频活化水的瞬时活性,即低频活化水在储存和应用后几天内就会恢复到水中,用低频活化水处理大肠杆菌导致超过4-log的减少,该研究成功地证明了低频活化水作为一种有效的环境良性消毒剂的可能性,为优化低频活化水的生化活性和将这种灭毒机制转化为生活中的应用提供了极大的依据。

关键词

低频活化水, 舒曼波活化水, 舒曼共振

Study on the Mechanism of SCER

Chao Duan, Jincai Ding

Henan Qidao Health Science and Technology Research Institute, Zhengzhou Henan

Email: dayou@sumanbo.com

Received: Apr. 21st, 2021; accepted: Jun. 4th, 2021; published: Jun. 23rd, 2021

Abstract

Diseases caused by pathogenic microorganisms and the use of conventional antimicrobial treatments have an increasing impact on social economy, environment and health. The resistance to antibiotics is getting stronger and stronger. Many common antibiotics have harmful biological side effects on human health and the immune system. This has prompted people to find new

文章引用: 段超, 丁进才. 低频活化水的灭毒机制研究[J]. 生物医学, 2021, 11(3): 134-141.

DOI: 10.12677/hjbm.2021.113018

cost-effective and efficient disinfection methods and methods to improve immunity. Low-frequency activated water (plasma activated water) is the product of the reaction between cold atmospheric plasma and water. It is a broad-spectrum fungicide with promising scientific research and development. The Schumann low-frequency 7.83 Hz emitted by the low-frequency resonance device replicates the frequency of the geomagnetic field. Schumann resonance is closely related to physical health. The Schumann wave of 7.83 Hz is basically close to the frequency of human brain waves and alpha waves. It has a certain effect on improving human immunity, assisting in improving sub-health, and activating cells. The instantaneous activity of low-frequency activated water, that is, the low-frequency activated water will be restored to the water within a few days after storage and application. Treatment of *E. coli* with low-frequency activated water resulted in a reduction of more than 4-log. This study successfully proved that low-frequency activated water can be used as The possibility of an effective environmental benign disinfectant provides a great basis for optimizing the biochemical activity of low-frequency activated water and transforming this detoxification mechanism into daily applications.

Keywords

SCER, Water Activated by Schumann Wave, Schumann Resonance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

低频活化水已成功地应用于从水处理到生物医学的各个领域, 并被证明是一种很有前途的生物危害灭活技术, 这是因为反应性物理和化学物种的有利组合, 如紫外线、电子、自由基、铁和受激分子。等离子体活化的过程是在没有任何其他化学物质的情况下进行的, 并产生了具有显著广谱杀生活性的产品。

尽管最近在开发和优化等离子体技术方面取得了重大进展, 但仍存在一些问题, 特别是在等离子体生成的经济 and 环境影响方面, 以及了解等离子体的生化活性和稳定性的机制方面。事实上, 文献中报道的大多数等离子体都是(一) 使用纯气体, 如氩气、氦气或氧气产生的; (二) 需要大量的电能来点燃和维持放电; 并且(三) 一次只用于处理有限体积的介质[1]。通过从可持续能源中获取能源, 并使用空气作为处理气体, 可以进一步降低等离子体产生的声光法的成本和环境影响。此外, 通过将这样产生的等离子体集成到一个连续的流动装置中, 有可能扩大等离子体的生产规模。然而, 重要的是要了解所建议的方法是否会赋予低频活化水必要程度的生物反应性, 这并不是小事, 因为对于哪些物种主要负责低频活化水的活性还没有达成共识[2]。

事实上, 由于紫外线、自由电子和电磁场的影响只存在于等离子体放电过程中, 光合作用的反应性本质上与种类丰富的高活性氧物种(ROS)和活性氮物种(RNS)有关, 这导致光合作用的高氧化-还原电位(ORP)和低 pH 值[3] [4]。尽管关于蒲公英反应性的研究非常丰富, 各个化学物质, 如羟基自由基(OH[·])、过氧化氢(H₂O₂)、15 臭氧(O₃)、16 超氧化物(O₂⁻)、一氧化氮(NO[·])的相对重要性, 以及它们共同给药所产生的协同作用, 但目前蒲公英生物杀伤活性的确切机制仍是一个争论的话题。例如, Zhang 等报道了活性氧(ROS), 如 OH[·], O₂⁻, 过氧化氢(H₂O₂)和臭氧, 在细菌灭活中起重要作用。Traylor 等人还提出, H₂O₂ 参与赋予低频活化水的杀菌活性。有几篇报道甚至认为参与的主导物种是过氧亚硝酸盐, 他们提出细菌灭活是由过氧化氢和亚硝酸盐连续生成的过氧亚硝酸盐实现的[5]。

过氧化亚硝酸盐是一个术语, 通常指阴离子(OONO^-)和质子化(ONOOH)形式, 具有显著的细胞毒性, 它在生物体健康和疾病管理中发挥着重要作用。这些化合物可以在生物系统中内源性产生, 在信号转导和抗菌防御中发挥重要作用, 因为过氧化亚硝酸盐水平升高会破坏关键的细胞成分, 导致细胞通过凋亡和坏死而死亡。从这个角度来看, 过氧化亚硝酸盐被认为是一种有前途的环境友好型抗菌剂。早期关于低频活化水生物活性的研究假设了低频活化水中可能形成过氧化亚硝酸盐, 从紫外可见吸收光谱和氟原探针研究中获得了一些证据, 用于过氧化亚硝酸盐的鉴定, 以及从特定等离子体生成的化学物质之间放电后反应的动力学模拟中获得了一些证据[6] [7]。然而, 这些努力还不能准确地量化低频活化水中的过氧化亚硝酸盐, 而且这种化学物质与细菌杀菌的关系也没有得到直接证明。因此, 目前仍不清楚等离子体处理是否可以作为产生这种抗菌剂的有效手段。

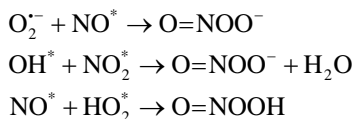
这项工作的目的是: (一) 更深入地了解使用大气压等离子体空气射流的连续流动系统产生和保留过氧化亚硝酸盐的机制; (二) 确定由此产生的过氧化亚硝酸盐对生物活性的单独和协同作用, 更具体地说, 确定过氧化亚硝酸盐对生物体的灭活能力。用化学和光学方法测定了低频活化水的电导率、ORP 和 pH 值, 以及低频活化水中常见的长寿命物种 H_2O_2 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 O_3 , 以及短寿命物种 ^-OH 和过氧化亚硝酸盐的浓度。大肠杆菌是一种具有已知的泌尿和胃病原性的细菌, 被用作微生物模型生物来研究和比较低频活化水和同等化学溶液的杀菌效果。此外, 还研究了在不同储存条件下蒲公英的稳定性, 以更好地了解蒲公英化学成分随时间的变化[8]。

2. 低频活化水的物理化学特性

等离子体处理使水中富含具有生物化学活性的活性氧和氮物种。将低频活化水的电导率、OPR 和 pH 值作为等离子体活化时间的函数进行评价, 结果如图 1 所示。电导率常被用作衡量水中存在的活性离子浓度的重要指标。空气等离子体活化 30 min 后, 低频活化水的电导率从 $24 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 大大增加至 $724 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 说明等离子体与 H_2O 分子在气液界面反应产生了各种活性物种[9]。处理 5 min 的低频活化水的 ORP 值达到 485 mV 左右, 在等离子体处理 30 min 后, ORP 值一路上升至 650 mV, 明显高于对照组(250 mV)。此外, 所得到的结果表明, 低频活化水中 RONS 的总体水平与血浆活化时间有很强的相关性, 说明活性物种可以在低频活化水中积累, 有望在低频活化水与细胞的相互作用中发挥关键作用。暴露于血浆后, 水的 pH 值明显下降, 特别是在处理的前 10 min (从 7~3.8), 血浆活化 30 min 后进一步下降到 3.10 [10] [11]。这是因为 NO_x 物种与 H_2O 分子反应形成的亚硝酸和硝酸酸。有人认为, 低频活化水的杀菌效率可能来自于高 ORP 和低 pH 值的结合。以往的研究证实, 在低 pH 值下, 这些活性自由基更容易穿透细胞壁, 在 pH 值低于 4.7 时, 测试的细菌种类能有效地被根除。Xu 等人得到的类似结果也表明, 高 ORP 可以改变氧化还原平衡, 增强细菌对酸性环境的敏感性[12]。

3. 测定低频活化水中的过氧化亚硝酸盐

过氧化亚硝酸盐是在血浆活化水中形成的一种重要活性物种。在生理条件下, 过氧化亚硝酸盐能够氧化、硝化和羟化生物分子, 这是过氧化亚硝酸盐细胞毒性的来源。Su 等报道过氧化亚硝酸盐的渗透系数为 $8.0 \times 10^{-4} \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 与 H_2O_2 的渗透系数相近, 约为超氧化物的 400 倍, 这种高渗透性使过氧化亚硝酸盐成为对细菌执行损伤的极有效氧化剂[13] [14]。已经证明过氧化亚硝酸盐在体外可以氧化硫醇、硫化物、过渡金属中心、抗坏血酸和芳香族。同时, 过氧化亚硝酸盐在低浓度下也表现出很强的抗菌性。在低频活化水中, 过氧化亚硝酸盐不仅可以通过反应生成, 还可以通过其他反应生成, 如:



将过氧化亚硝酸盐引入叶酸溶液中, 产生了高荧光产物, 使光谱特征急剧增加, 荧光发射最大值在 460 nm [15]。荧光增量与过氧化亚硝酸盐浓度在 0~3.2 μM 范围内呈线性关系, 相关系数(R2)为 0.9999。基于这种方法, 测定了低频活化水中过氧化亚硝酸盐的浓度。结果表明, 用空气等离子体处理的水中的过氧化亚硝酸盐的量在暴露的前 20 分钟内稳步增加, 与 NO_2^- 和 H_2O_2 的浓度变化相呼应, 表明过氧化亚硝酸盐通过反应形成(18)。然而, 随着血浆暴露时间的增加, 从 20 分钟到 30 分钟, 过氧化亚硝酸盐的浓度只增加了从 1.8 μM 到 20.2 μM , 与动力学模拟的结果很好地一致, 在过氧化亚硝酸盐浓度增加的速度放缓, 表明过氧化亚硝酸盐分解过程的存在, 可能通过下式反应[16]。此外, 根据这里讨论的结果和其他等离子体-液体化学的理论和实验研究的报告, 过氧化亚硝酸盐可以被认为是连接 ROS 和 RNS 的桥梁, 以复杂的链式方式。

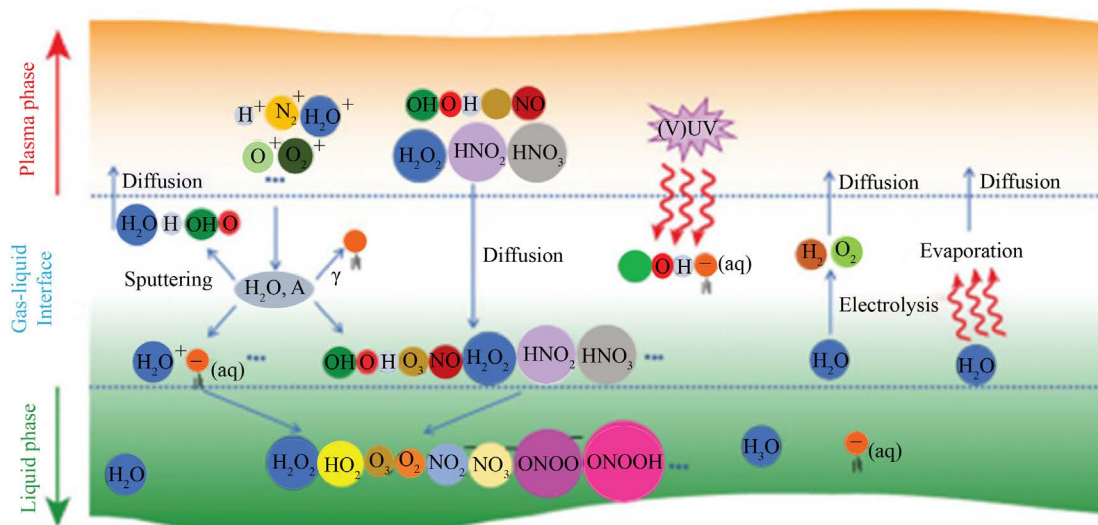
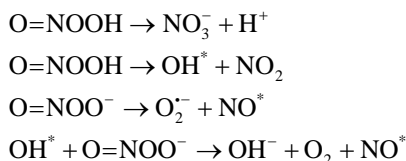


Figure 1. Possible mechanism of sending reactive oxygen and nitrogen species (RONS) produced in the gas phase into the solution

图 1. 将气相中产生的活性氧和氮物种(RONS)送入溶液的可能机制

4. 低频活化水和模拟溶液对细菌消毒的比较

等离子体活化水比使用化学前体制备的类似溶液对大肠杆菌更有效[17]。为了更深入地了解低频活化水中物种对细菌灭活的影响, 分别制备了含有与低频活化水中 H_2O_2 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 O_3 等量浓度的化学溶液, 并应用于与大肠杆菌反应。由于已经广泛证实, 等离子体活化溶液的 pH 值和温度对其杀菌效率有一定的影响, 所有溶液的 pH 值都用 HCl 进行了相应的仔细调整, 使其与低频活化水的 pH 值相当, 所有细菌灭活的温度保持在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。对照组获得的微生物计数高达 6.88 log CFU, 而用低频活化水处理的样品在血浆处理 5、10、20、30 min 后产生的对数值分别为 5.85、4.72、3.09、2.48, 证实低频活化水是测试溶液中较有效的抗菌剂, 如图 2 所示。显然, 当 pH 值降至 3.1 时, H^+ 仅表现出轻微的抗菌活性(对数降低 0.15), 这与以往的调查一致 48 酸化 H_2O_2 和 NO_2^- 对大肠杆菌失活的影响, 在浓度高达 1.2 和 0.38 mM 的情况下, 进一步证实了其在杀菌方面起到了适度的作用, 因为对数值相应降至 5.82 和 6.04。 NO_3^- 对大肠杆菌失活

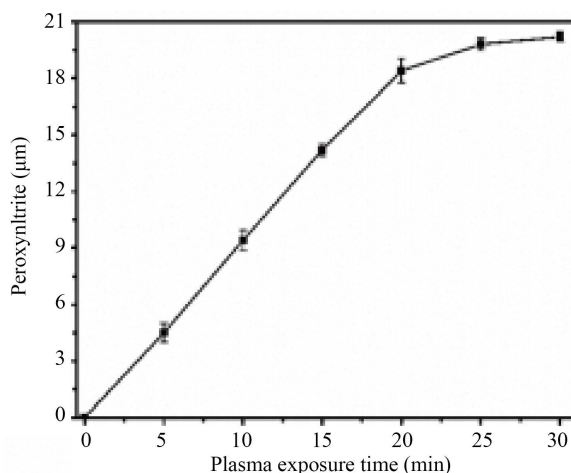
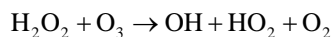
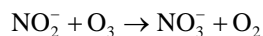


Figure 2. The formation of peroxyntrite in low-frequency activated water under different plasma exposure time

图 2. 不同血浆下低频活化水中过氧化亚硝酸盐的形成情况曝光时间

的影响有限, 这一点用 NO_3^- 和 NO_2^- 混合物进一步证实。随着 NO_2^- 的加入模仿反应, H_2O_2 的效率可以显著提高, 10、20 和 30 分钟低频活化水对应的对数值分别为 5.65、4.16 和 3.25。此外, 当 NO_3^- 混入 NO_2^- 和 H_2O_2 的溶液中时, 灭活作用进一步加强(对数值达到 3.02), 这可能是由于通过反应分解 ONOOH (占 ONOOH 分解量的 70%) 会受到 NO_3^- 某种程度的抑制[18]。在 O_3 和 $-\text{OH}$ 的情况下, 实验只在 30 分钟的低频活化水条件下进行, 因为这两个物种的浓度太低(在某些情况下, 低于分析方法的检测限), 限制了对相关结果的信心。虽然指定浓度的 O_3 和 $-\text{OH}$ 都没有达到很好的灭菌效果, 但一旦将它们与 NO_2^- 、 H_2O_2 和 NO_3^- 的组合加入溶液中, 其抑制效率(对数值 2.71)与低频活化水相当。反应揭示了 $-\text{OH}$ 在过氧化亚硝酸盐形成中的重要性; 虽然大部分臭氧会被亚硝酸盐离子通过反应分解(28), 但也有可能通过反应转化为 $-\text{OH}$ 。此外, 根据刚才讨论的方法, 先后对模拟 30 min 低频活化水的 $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NO}_3^-$ 和 $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NO}_3^- + \text{O}_3 + -\text{OH}$ 的混合溶液进行了过氧化亚硝酸盐的定量分析, 过氧化亚硝酸盐的浓度分别为 17.8、18.6 和 19.5 μM , 进一步证实了过氧化亚硝酸盐的形成, 为上述机制提供了进一步的证据[19] [20]。

血浆活化水通过氧化应激杀灭细菌。根据本研究 and 文献的结果, 可以提出基于过氧化亚硝酸盐的杀菌机制[21]。首先, 空气等离子体放电会与其他 RONS 一起在暴露水中产生一定量的过氧化亚硝酸盐, 并显著导致该水的酸化[22] [23]。由于 pH 值较低, 主要以 ONOOH 形式存在的过氧化亚硝酸盐具有快速穿过细胞膜脂质双层的能力, 可直接或通过其分解为单电子氧化剂如 $-\text{OH}$ 和 NO_2^- 等, 引发脂质和蛋白质的过氧化和硝化作用。这些颗粒与细胞膜的反应, 通过在膜上形成瞬时孔隙, 有利于更多的 RONS 渗透到细胞中, 从而增强细胞的通透性。过氧化亚硝酸盐可能在细胞内积聚并降解成更多的高活性颗粒, 导致细胞内 RONS 的增加。细胞凋亡和坏死都会在过氧化亚硝酸盐的诱导下发生, 最终杀死细胞[24] [25]。



进一步的实验将细菌失活的程度与过氧化亚硝酸盐的浓度直接相关。由于一些可能参与过氧化亚硝酸盐生成的物种的有效扩散距离(EDL)较短, 过氧化亚硝酸盐被认为主要来源于水相中的长效过氧化氢和亚硝酸盐按照这个逻辑, 如果水相亚硝酸盐的浓度降低, 那么血浆生成的过氧化亚硝酸盐的浓度也会降低[26]。此外, 如果低频活化水的细胞失活效应有相应的降低, 那么过氧化亚硝酸盐在细胞失活中的关键作

用将直接得到证明。为了验证这一理论, 我们用化学方法制造了一种类似低频活化水的溶液, 其中除了亚硝酸盐的浓度外, 其他物种的浓度与血浆生成的低频活化水相近, 并将亚硝酸盐的浓度从与原低频活化水相同的水平变化到相当低的水平。可以看出, 当亚硝酸盐的浓度降低时, 水相中过氧化亚硝酸盐的浓度降低, 细胞失活效果也相应降低。以上结果证实, 过氧化亚硝酸盐是血浆产生的直接导致低频活化水对大肠杆菌细胞灭活作用的关键活性物种之一, 如图 3 所示[27] [28]。

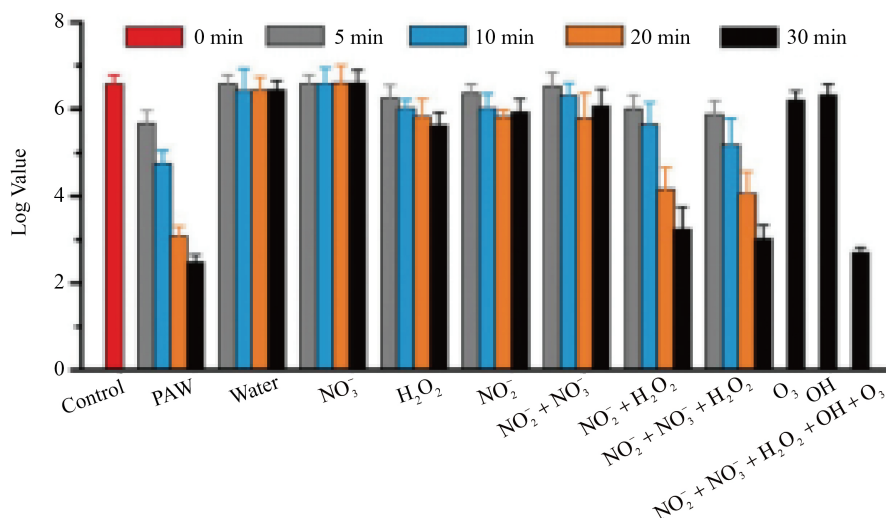


Figure 3. The disinfection ability of low-frequency activated water and simulated solution against *E. coli* (the time shown is related to the plasma exposure time)

图 3. 低频活化水和模拟溶液对大肠杆菌的消毒能力(所示时间与等离子体暴露时间有关)

5. 为什么低频共振的频率是 7.83 赫兹

7.83 Hz 起源于舒曼共振, 舒曼波是由全球电磁共振现象是以物理学家温弗里德-奥托-舒曼(Winfried Otto Schumann)的名字命名的, 他在 1952 年用数学方法观测到了这种波段。舒曼共振发生的原因是, 地球表面和导电电离层之间的空间充当了一个封闭的波导。地球有限的尺寸使这个波导成为 ELF 波段电磁波的共振腔。该腔体自然会被雷电中的电流激发。舒曼共振是电磁波频谱中从 3 赫兹到 60 赫兹部分的主要背景, 在 7.83 赫兹(基频)、14.3、20.8、27.3 和 33.8 赫兹左右的极低频(ELF)出现明显的峰值, 所以舒曼波也被称为地球自身的频率[29] [30]。

在舒曼共振的正常模式描述中, 基本模式是地球-电离层空腔中的驻波, 波长等于地球的圆周。最低频率的模式强度最高, 由于太阳对电离层的扰动(电离层会压缩封闭腔的上壁)等因素, 所有模式的频率都会略有不同。较高的共振模式间隔约为 6.5 赫兹(通过将数字输入公式可以看出), 这是大气层的球形几何特征。峰值表现出约 20% 的光谱宽度, 考虑到耗散腔中各自模式的阻尼[31]。

6. 结论

等离子体产生的物种和水之间的相互作用是至关重要的等离子体在生物学和医学领域的大多数应用。在本研究中, 由大气压等离子体空气射流在连续流动系统中产生的等离子体活化水(低频活化水)已被证明是一种有前途的大肠杆菌消毒剂, 其对数值减少了 4 以上, 讨论并量化了低频活化水中的物种, 包括 H₂O₂、NO₂⁻、NO₃⁻ 和过氧化亚硝酸盐, 并利用模拟化学溶液分别鉴定了这些物种的杀菌活性。研究表明, 过氧化亚硝酸盐主要来源于 H₂O₂ 和 NO₂⁻ 的反应, 在暴露于 30 min 空气等离子体下, 用叶酸增强

荧光法测定, 低频活化水中的浓度约为 20 Mm [32]。抗菌研究清楚地表明, 过氧化亚硝酸盐是负责低频活化水生物活性的关键物种。重要的是, 应用相当于在低频活化水中发现的 H_2O_2 、 NO_3^- 或 NO_2^- 的剂量, 未能达到与报告的含有过氧化亚硝酸盐或其与其他物种的混合物的低频活化水和低频活化水样溶液相同的灭菌效率。贮存研究结果表明, 碱性条件和低温对保持低频活化水的抗菌反应性具有重要意义。综上所述, 本研究中提出的水的等离子体处理方法是一种有吸引力的方法, 可以生产出仅用化学方法无法轻易再现的生物活性溶液。因此, 这种方法值得进一步开发和研究, 作为传统化学处理方法的绿色独立替代或补充技术。随着对控制低频活化水中反应性化学的时间演变的基本化学过程的深入了解, 这种技术可以在功效和选择性方面进一步优化。

参考文献

- [1] 钼晓艳, 李海蓝, 吴迪, 刘舒彦, 李湃, 高梦婷, 张金木. 等离子体活化水对青椒尖孢镰刀菌的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 39-46.
- [2] Chao, S.H., Carlson, R. and Meldrum, D.R. (2007) Rapid Fabrication of Microchannels Using Microscale Plasma Activated Templating (μ plat) Generated Water Molds. *Lab on a Chip*, **7**, 641-643. <https://doi.org/10.1039/B618269K>
- [3] 钼晓艳, 刘舒彦, 李海蓝, 吴迪, 谢婷婷, 李湃, 熊光权. 等离子体活化水对加州鲈巴氏葡萄球菌的抑制作用[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 124-130.
- [4] 张亚雷, 周雪飞, 陈家斌, 姚秋芳. 一种电化学活化水对医院废水杀菌同步去除 PPCPs 的方法[P]. 中国专利, CN201911263599.7, 2020-03-27.
- [5] Traylor, M.J., Pavlovich, M.J., Karim, S., Hait, P. and Graves, D.B. (2011) Long-Term Antibacterial Efficacy of Air Plasma-Activated Water. *Journal of Physics D Applied Physics*, **44**, 472001-472004. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/47/472001>
- [6] 陈俊廷. 一种活化水增能仪[P]. 中国专利, CN202010082131.4, 2020-05-19.
- [7] Igor, S. MRET 处理过的水可能可以抑制冠状病毒生命周期[J]. 生物医学, 2020, 10(3): 43-49. <https://doi.org/10.12677/HJBM.2020.103007>
- [8] 张亚兰, 郑海潮, 卫晓丽, 张海兰, 杨扬, 赵鑫. Haart 对 hiv/aids 患者 t 淋巴细胞活化及 CD4^+ CD45 RA^+ T 细胞亚群的影响[J]. 中华微生物学和免疫学杂志, 2020, 40(7): 518-522.
- [9] Oh, J.S., Szili, E.J., Ogawa, K., Short, R.D., Ito, M. and Furuta, H., *et al.* (2018) UV-Vis Spectroscopy Study of Plasma-Activated Water: Dependence of the Chemical Composition on Plasma Exposure Time and Treatment Distance. *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**, Article ID: 0102B9. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.0102B9>
- [10] 张然. 活性炭孔隙结构对 HI 催化分解的影响研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [11] 满海萍. 大量输血后患者相关生化指标的变化及临床意义[J]. 家有孕宝, 2020, 2(22): 153.
- [12] 宋占帅, 张蓉, 张娟, 邵华. 抑制 nlrp3 炎症小体活化对二氧化硅粉尘致巨噬细胞炎症反应的影响[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2020, 38(6): 406-409.
- [13] 李佳行, 杨胜乾, 刘娟娟, 罗明明, 陈杰, 李晓辉. 连翘苷对脂多糖诱导肝脏星状细胞活化的抑制作用[J]. 第三军医大学学报, 2020, 42(4): 342-349.
- [14] 陈海伦, 宏小翠, 胡克辉, 杨海霞, 陈曼, 易智君. 信号传导及转录活化因子 3 和 x 连锁凋亡抑制蛋白在肿瘤组织的表达及其临床意义[J]. 中华实验外科杂志, 2020, 37(12): 2341-2343.
- [15] 刘舒彦, 李海蓝, 李湃, 吴迪, 吴雨晨, 钼晓艳. 等离子体活化水对希瓦氏菌及鲑鱼品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(9): 25-30.
- [16] 吴振龙, 张亚. 化学镀镍金中活化药水变黑分析[J]. 印制电路信息, 2020, 28(10): 64-66.
- [17] 刘东平, 高万林, 黄峰, 杨柳. 一种高效等离子体活化水产生设备[P]. 中国专利, CN201911276662.0, 2020-03-24.
- [18] 董国喆, 张顺生. 一种活化水制备装置[P]. 中国专利, CN201920466944.6, 2020-01-03.
- [19] 袁园, 黄明明, 魏巧云, 章建浩, 严文静. 等离子体活化水对鲜切生菜杀菌效能及贮藏品质影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 281-285, 292.
- [20] Andreev, S.N., Apasheva, L.M., Ashurov, M.K., Lukina, N.A. and Shcherbakov, I.A. (2019) The Production of Pure

- hydrogen Peroxide Solutions in Water Activated by Plasma of the Electrodeless Microwave Discharge and Their Application to Control Plant Growth. *Doklady Akademii nauk/Rossiskaia akademii nauk*, **486**, 297-300.
<https://doi.org/10.31857/S0869-56524863297-300>
- [21] 孙大文, 潘园园, 成军虎, 韩忠. 基于超声辅助等离子活化水进行果蔬清洗及保鲜的方法[P]. 中国专利, CN201911079620.8, 2020-03-24.
- [22] Graves, D., Pavlovich, M., Chang, H.W., Sakiyama, Y. and Clark, D. (2013) Air Surface Microdischarge-Photon Synergy in Antibacterial Plasma-Activated water. *Biomedical Engineering*, **58**, 3234-3234.
- [23] Zhang, Q., Liang, Y., Feng, H. and Ma, R. (2013) A Study of Oxidative Stress Induced by Non-Thermal Plasma-Activated Water for Bacterial Damage. *Applied Physics Letters*, **102**, Article ID: 141502.
<https://doi.org/10.1063/1.4807133>
- [24] Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q. and Zhang, J. (2016) Effect of Plasma Activated Water on the Postharvest Quality of Button Mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chemistry*, **197**, 436-444.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.144>
- [25] Shen, J., Tian, Y., Li, Y., Ma, R. and Fang, J. (2016). Bactericidal Effects against *S. aureus* and Physicochemical Properties of Plasma Activated Water Stored at Different Temperatures. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 28505.
<https://doi.org/10.1038/srep28505>
- [26] Tian, Y., Ma, R., Zhang, Q., Feng, H., Liang, Y. and Zhang, J., *et al.* (2015) Assessment of the Physicochemical Properties and Biological Effects of Water Activated by Non-Thermal Plasma above and Beneath the Water Surface. *Plasma Processes and Polymers*, **12**, 439-449. <https://doi.org/10.1002/ppap.201400082>
- [27] Naumova, I.K. Maksimov, A.I. and Khlyustova, A.V. (2011) Stimulation of the Germinability of Seeds and Germ Growth under Treatment with Plasma-Activated Water. *Surface Engineering & Applied Electrochemistry*, **47**, 263-265.
<https://doi.org/10.3103/S1068375511030136>
- [28] 苏江维, 余慧, 杜坤, 汪洁, 柳林, 蔡剑. Notch1 表达下调抑制病理性瘢痕成纤维细胞增殖并诱导其凋亡[J]. 基础医学与临床, 2020, 40(3): 328-333.
- [29] Ma, R., Yu, S., Tian, Y., Wang, K. and Fang, J. (2016) Effect of Non-Thermal Plasma-Activated Water on Fruit Decay and Quality in Postharvest Chinese Bayberries. *Food and Bioprocess Technology*, **9**, 1825-1834.
<https://doi.org/10.1007/s11947-016-1761-7>
- [30] Yoo, S.R., Park, J.S, Ryu, S.M., Hong, E.J., Lho, T., Jang, S.O., *et al.* (2012). A Method for Generating Plasma Activated Water and Its Biological Assessments. 2012 *Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science*, Edinburgh, 8-13 July 2012, 1P-151. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2012.6383479>
- [31] Machala, Z., Tarabová, B., Sersenová, D., Janda, M. and Hensel, K. (2018). Chemical and Antibacterial Effects of Plasma Activated Water: Correlation with Gaseous and Aqueous Reactive Oxygen and Nitrogen Species, Plasma Sources and Air Flow Conditions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **52**, Article ID: 034002.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae807>
- [32] 王修, 徐丹蕾, 缪荣华, 何义. 美托洛尔对冠心病慢性心力衰竭患者核因子- κ B, 低氧诱导因子-1 α 活化水平影响分析[J]. 心脑血管病防治, 2020, 20(5): 534-536, ISTIC.