



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目: 不同波长 LED 光源灭活病毒效果对比及机制研究
作者: 王超杰, 邓江, 赵宁, 李佳旭, 韩勇娇, 李明媛
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250137
收稿日期: 2025-09-10
网络首发日期: 2026-01-29
引用格式: 王超杰, 邓江, 赵宁, 李佳旭, 韩勇娇, 李明媛. 不同波长 LED 光源灭活病毒效果对比及机制研究[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250137>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250137

不同波长 LED 光源灭活病毒效果对比及机制研究

王超杰^{1,2}, 邓江², 赵宁², 李佳旭^{1,2}, 韩勇娇^{1,2}, 李明媛¹

(1. 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457; 2. 军事医学研究院, 北京 100850)

摘要: 光灭活是环境病原微生物消杀的重要手段, 传统短波紫外线 (UVC) 存在安全隐患, 而长波紫外线 (UVA) 365 nm 及可见光 405、450 nm 等较长波长光源因安全性和穿透性优势受到关注。本研究在无外源性光敏剂条件下, 采用上述 3 种 LED 单波长光源, 通过含薄片状聚氯乙烯 (PVC) 通道的辐照装置 (蠕动泵控液), 校准光谱及能量后, 以伪狂犬病病毒 (PRV) 和辛德毕斯 (Sindbis) 病毒为对象, 比较不同液面高度、照射时间的灭活效果, 并结合扫描电子显微镜和活性氧 (ROS) 去除实验探究其灭活机制。结果显示, 365 nm 波长照射的灭活效果最优, 20 min 低液面下对两种病毒的滴度下降分别达 2.31 和 3.63, 显著优于 405 nm 及 450 nm 波长的灭活效果; 进一步实验证实 ROS 的产生参与 365 nm 灭活过程。总之, 本研究证实 365 nm 光源照射对病毒灭活损伤作用显著优于 405、450 nm 照射, 是目前符合生物安全的较优波长光源选择。

关键词: LED 光源; 病毒灭活; 光灭活机制; 伪狂犬病病毒; 辛德毕斯病毒

中图分类号: Q592.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (0000)00-0000-00

Comparison of Virus Inactivation Efficacy of LED Light Sources with Different Wavelengths and Study on the Mechanism

WANG Chaojie^{1,2}, DENG Jiang², ZHAO Ning², LI Jiayu^{1,2}, HAN Yongjiao^{1,2}, LI Mingyuan¹

(1. College of Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Academy of Military Medical Science, Beijing 100850, China)

Abstract: Photoinactivation is an important means for disinfection of environmental pathogenic microorganisms. Traditional short-wavelength ultraviolet (e.g., UVC) has safety risks due to its high energy, while longer-wavelength light sources such as 365 nm (UVA) and 405, 450 nm (blue-violet light) have attracted attention for their advantages in safety and penetrability. Under the condition of no exogenous photosensitizers, this study used the above three single-wavelength LED light sources. Through an irradiation device with thin PVC channels (liquid controlled by a peristaltic pump), after calibrating the spectrum and energy, PRV and Sindbis viruses were used as subjects to compare the inactivation effects under different liquid levels and irradiation times, and the mechanism was explored through electron microscopy and ROS scavenging experiments. The results showed that 365 nm exhibited narrow-spectrum emission and had the best inactivation efficacy. The titer reduction of the two viruses under low liquid level for 20 min reached -2.31 and -3.63, respectively, which was significantly better than the other two wavelengths, and the effect under low liquid level was better. Electron microscopy showed that the viral capsids were intact. ROS scavenging experiments confirmed that ROS was involved in inactivation and there might be direct damage to genetic material.

收稿日期: 2025-09-10; 修回日期: 2025-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82200738)

作者简介: 王超杰(1997—), 男, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 李明媛, 副教授, ddsnano@126.com

Key words: LED light sources; virus inactivation; photoinactivation mechanism; pseudorabies virus (PRV); Sindbis virus

病毒作为高度传染性病原微生物，对全球公共卫生构成持续威胁。光灭活技术凭借无化学残留、操作便捷等优势，已成为医疗环境消毒、食品加工安全等领域杀灭病原微生物的核心手段之一。传统灭活光源多依赖短波紫外线(UVC, 200~280 nm)，其通过破坏微生物遗传物质实现高效灭活^[1-3]，但高能量特性易导致眼角膜损伤、皮肤癌患病风险增加等风险^[4-6]。近年来，长波紫外线(UVA)波段 365 nm 及可见光 405、450 nm 等较长波长光源因安全性更高、穿透能力更强，逐渐成为研究热点^[7-9]。

尽管当前研究较多，但仍存在不足限制了其在实际场景中的广泛应用。多数研究依赖光源与外源性光敏剂(如亚甲蓝、核黄素等)的联合使用，虽然能增强灭活效果，但是光敏剂的化学残留易造成环境负担，且增加成本与回收处理难度^[10-11]，单纯光照灭活的深入研究明显不足。此外，纯光照灭活研究多聚焦单一病毒或单一波长^[12-13]，缺乏对不同病毒株的广泛验证与多波长光源的平行比较。因此，亟需对 3 种波长光源的灭活效果进行全面、综合的比较，以确定最优技术方案。

本研究以伪狂犬病病毒 (PRV) 和辛德毕斯 (Sindbis) 病毒为 DNA、RNA 病毒的指示病毒，二者安全性高、结构明确、剪接性强，常用于灭活技术与消毒方法的评价，能有效反映不同类型病毒的光灭活规律，在无外源性光敏剂条件下，系统开展病毒灭活效果的平行比较。首先，建立多波长 LED 光源灭活仪器平台，以系统筛选最优光源的灭活参数；其次，系统比较 365、405、450 nm 单波长 LED 光源在不同液面高度和不同照射时间下的灭活效果，并基于双波长复合光源实验探究其协同作用；最后结合扫描电子显微镜形态观察及活性氧 (ROS) 干预实验，揭示光灭活的机制，进而探索 UVA 在安全光谱范围内的病毒灭活潜力，以及其在对光敏生物制品(如血液制品)灭活中的可行性。

1 材料与方法

1.1 病毒与细胞

病毒株 PRV 和 Sindbis，均由实验室保存。宿主细胞为 Vero 细胞，培养于含 10% 胎牛血清的 MEM 培养基中，在 37℃、5% CO₂ 培养箱中传代。

1.2 实验过程

1.2.1 光源与辐照装置

光源与辐照装置采用 365、405、450 nm 单波长 LED 光源，使用 LS125 型多探头紫外辐照计(深圳市林上科技有限公司)校准光谱特性及光输出功率，测定不同功率百分比下的能量密度，绘制能量-功率曲线，校准至目标辐照功率 150 mW/cm²，确保 3 种波长光源的辐照能量一致。辐照装置含薄片状聚氯乙烯 (PVC) 通道(低液面液面厚度约为 3.1 mm，高液面液面厚度约为 6.2 mm)，通过蠕动泵(转速 50 r/min)稳定推动液体流动，确保病毒液均匀受照。

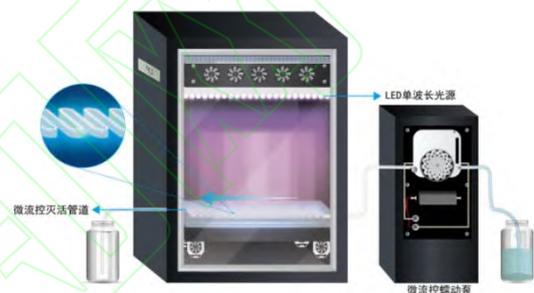


图 1 LED 光源辐照灭活装置

Fig.1 LED light source irradiation inactivation device

1.2.2 病毒灭活实验

测定每 0.1 mL 的半数组织培养感染量(TCID₅₀)，计算其常用对数值，即为病毒滴度(用符号 *D* 表示)。取病毒悬液 (D_{PRV} : 5.5~5.6; $D_{Sindbis}$: 6.2~6.7) 加入 PVC 通道，分别在 365、405、450 nm 光源下照射 10 min 和 20 min，设置同管内病毒原液未照射组为对照。低液面 (3.1 mm) 和高液面 (6.2 mm) 条件下分别进行实验，每组 4 次重复。

1.2.3 机制验证实验

分别取灭活前后的病毒液各 1 mL，加 2.5% 戊二醛(分析纯) 4℃ 固定 2h，PBS 洗 3 次，梯度乙醇脱水后 CO₂ 临界点干燥，喷 5 nm 金膜^[14]。用 SU8100 型扫描电子显微镜(加速电压 10 kV) 选 5 个视野观察，ImageJ 统计直径 ≥ 100 nm 的病毒颗粒，对比灭活前后形态差异。

ROS 干预实验：在病毒悬液中分别加入终浓度 100 U/mL 的过氧化氢酶(北京索莱宝科技有限公司) 和 50 mmol/L 的甘露醇(北京索莱宝科技有限公司)，与未加试剂组(正常灭活组) 比较灭活效果差异。

1.3 数据收集

1.3.1 病毒滴度检测

采用微量细胞培养法,将处理后的病毒液进行10倍梯度稀释,接种于96孔板中的宿主细胞,培养3d后观察细胞病变效应。采用Reed-Muench法计算病毒滴度,即测定每0.1 mL的半数组织培养感染量(TCID₅₀),计算其常用对数值,即为病毒滴度(用符号D表示)。病毒滴度的变化值按照式(1)计算。

$$\Delta D=L-d(s-0.5) \quad (1)$$

式中:L为最高稀释度的常用对数,d为稀释度常用对数之间的差,s为阳性孔比率总和。

1.3.2 光谱与形态学数据

记录3种光源的发射光谱(半峰宽、峰值波长)、能量密度-功率校准曲线;扫描电子显微镜下观察病毒颗粒的形态完整性。

1.4 实验重复与质量控制

所有实验均独立重复4次,结果以“平均值±标准差”表示。病毒滴度检测设8个复孔,空白对照组(未接种病毒的细胞)用于排除污染干扰,确保数据可靠性。

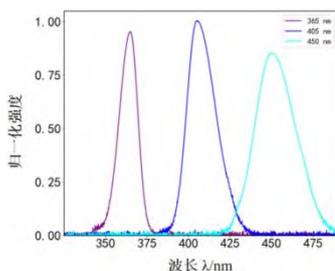
1.5 统计分析

采用GraphPad Prism 8.0软件进行统计分析。多组间比较采用单因素方差分析(ANOVA),组内两两比较采用Dunnett-t检验;P<0.05为差异具有统计学意义。

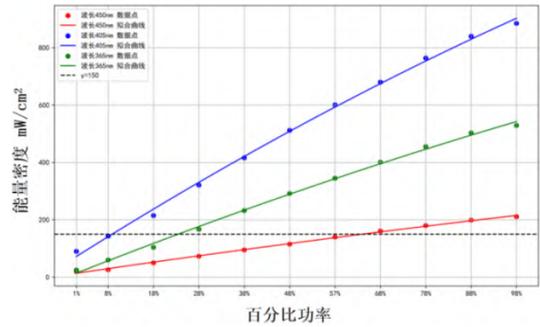
2 结果与分析

2.1 光源光谱特性及能量校准

LED光源的归一化发射光谱以及不同波长光源在不同功率百分比下的能量密度曲线如图2所示。实验所用365、405、450 nm 3种LED光源均呈现窄谱发射特征,其发射峰分别位于365 nm、405 nm和450 nm附近,半峰宽较窄且无明显杂散光干扰,可满足单波长照射实验的要求。为确保不同波长光源在灭活实验中对样品的辐照能量一致,405、365、450 nm光源达到150 mW/cm²时的功率百分比分别为9%、25%、62%,校准至目标辐照功率150 mW/cm²。



(a) 光源光谱图



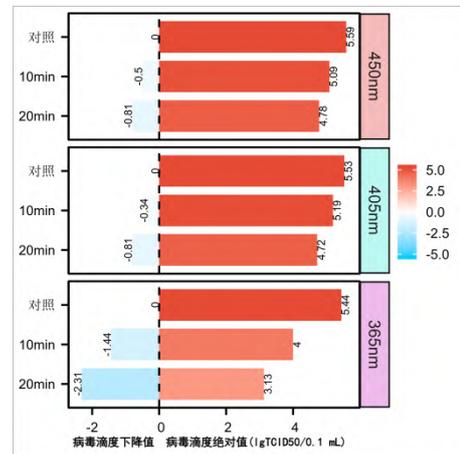
(b) 归一化光源辐照能量

图2 LED光源的归一化发射光谱以及不同波长光源在不同功率百分比下的能量密度曲线

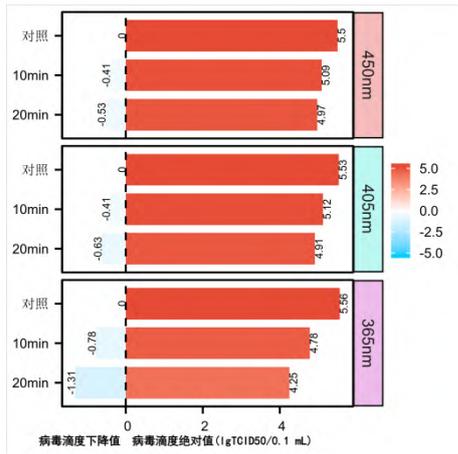
Fig.2 Normalized emission spectrum of LED light source and energy density curves of light sources at different wavelengths under varying power percentages

2.2 不同波长光源对PRV病毒灭活效果比较

PRV病毒在低液面和高液面条件下的灭活效果如图3所示。结果表明,365 nm波长具有最优的灭活性能。在照射20 min时,365 nm处理组病毒滴度下降在低液面达2.31,高液面达1.31;照射10 min时,低液面和高液面分别达1.44和0.78,明显优于405 nm(低液面0.81,高液面0.63)和450 nm(低液面0.81,高液面0.53)处理组的灭活效果。所有波长条件下均表现出明显的液面效应,这一结果确认了短波紫外线在PRV病毒灭活中的技术优势,为后续病毒种类间敏感性比较提供基础数据。



(a) PRV 低液面灭活效果



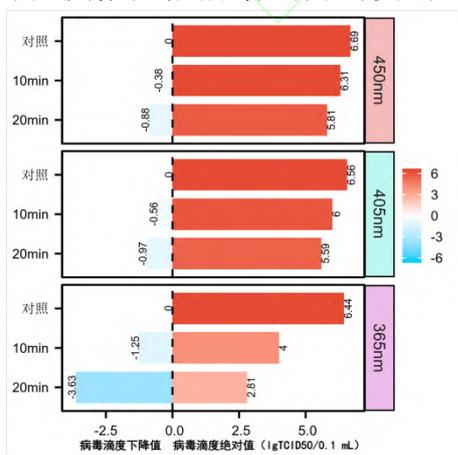
(b) PRV 高液面灭活效果

图 3 PRV 病毒在低液面和高液面条件下的灭活效果

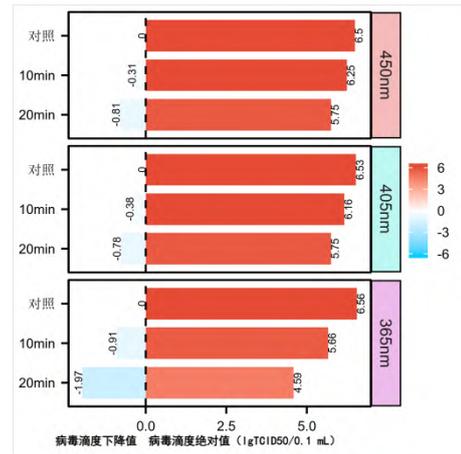
Fig.3 Inactivation effect of PRV virus under low and high liquid level conditions

2.3 不同波长光源对 Sindbis 病毒灭活效果比较

Sindbis 病毒在低液面和高液面条件下的灭活效果如图 4 所示。3 种波长 LED 光源对 Sindbis 病毒均呈现时间依赖性的灭活特征，其中 365 nm 波长表现出最优的灭活效果。在照射 20 min 时，365 nm 处理组病毒滴度下降显著：低液面达 3.63，高液面达 1.97；照射 10 min 时，低液面和高液面分别达 1.25 和 0.91，均明显优于 405 nm（低液面 0.56~0.97，高液面 0.38~0.78）和 450 nm（低液面 0.38~0.88，高液面 0.31~0.81）处理组。病毒种类敏感性比较显示，Sindbis 病毒对光灭活的响应性显著强于 PRV，在 365 nm 最优处理条件下（20 min，低液面），Sindbis 病毒滴度下降（3.63）较 PRV（2.31）高出 1.32，表明 RNA 病毒相比 DNA 病毒具有更低的光灭活阈值。此外，所有波长条件下均观察到明显的液面效应，其中 365 nm 条件下的液面差异最大（1.66），进一步证实了短波紫外线在病毒灭活中的优越性。



(a) Sindbis 低液面灭活效果



(b) Sindbis 高液面灭活效果

图 4 Sindbis 病毒在低液面和高液面条件下的灭活效果

Fig.4 Inactivation effect of Sindbis virus under low and high liquid level conditions

2.4 复合光源的灭活效果比较

为探究双波长复合照射对 PRV 的灭活效果是否存在协同作用，通过对比两种双波长组合（365 nm + 450 nm、365 nm + 405 nm）同时辐照病毒的效果，与相同功率下两种单波长分别辐照不同病毒的灭活效果叠加值进行分析，通过对比双波长组合的灭活效果（灰色柱）与相同功率下两种单波长分别辐照的灭活效果叠加值（橘色柱+蓝色柱）实现，结果如图 5 所示。两种双波长组合在各时间点的灭活效果均高于单一单波长效果，但略低于对应单波长的叠加值，双波长辐照未表现出明显协同作用。以上结果表明，在相同功率及照射距离下，与 405nm、450nm 相比，365nm 纯光照方法在两种不同厚度的液体环境下，均展现了对 PRV、Sindbis 病毒的最佳灭活效果。

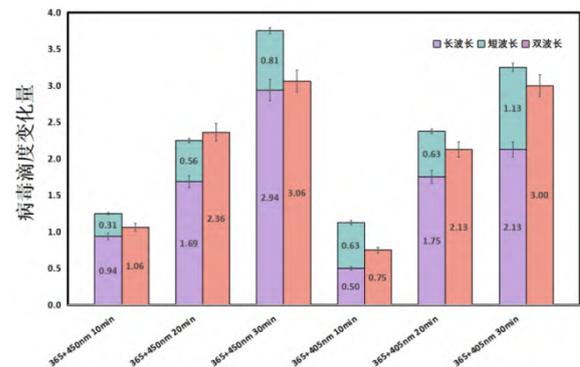


图 5 75mW 双光源组合与单光源叠加的灭活效果及协同作用

Fig.5 Inactivation effect and synergistic effect of 75mW dual light source combination and single light source superposition

2.5 365nm 光灭活病毒的机制探究

进一步探索 365nm 照射对病毒灭活效果的机制,扫描电子显微镜观察结果如图 6 所示。灭活前病毒颗粒结构完整,呈典型的球形,表面光滑,蛋白外壳轮廓清晰;经光源照射灭活后,病毒颗粒的大小、形态及蛋白外壳完整性未发生明显改变,未观察到外壳断裂、塌陷或解体等现象,表明光灭活过程未通过破坏病毒蛋白外壳实现灭活。

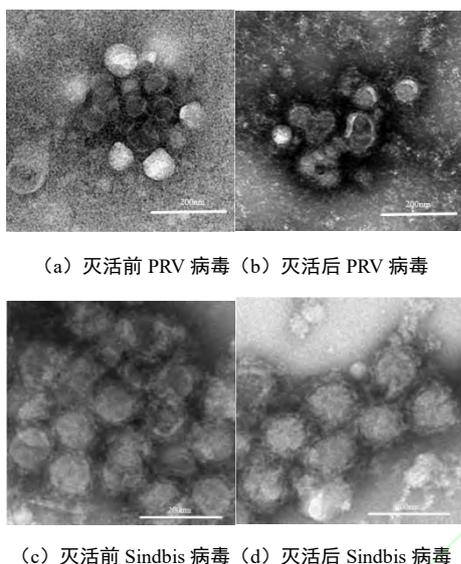


图 6 灭活前后病毒的扫描电子显微镜图

Fig.6 Scanning electron microscopy image of the virus before and after inactivation

进一步对光灭活过程中 ROS 参与光灭活的机制验证实验结果如图 7 所示。对不同处理组病毒滴度的检测结果显示,未添加 ROS 去除试剂的正常灭活组的灭活效果最优;添加过氧化氢酶(清除 H_2O_2)和甘露醇(清除羟基自由基)后,灭活效果均显著下降。这表明光灭活过程中产生的如过氧化氢、羟基自由基等 ROS 是 365nm 光照灭活的主要灭活机制之一。

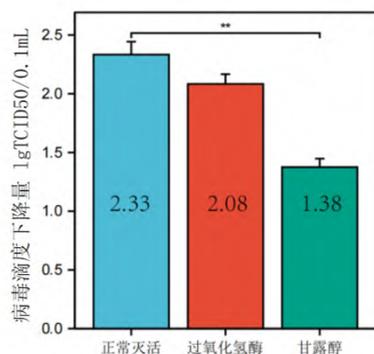


图 7 添加不同 ROS 去除试剂对灭活效果的影响

Fig.7 Effect of adding different ROS removal reagents on inactivation efficiency

3 讨论

纯光照病毒灭活技术逐渐成为光生物学、病毒学领域的前沿热点之一^[15-17]。与传统化学灭活方法相比,光照灭活技术具有诸多优势:可在环境中大面积应用^[18],成本低廉,无化学残留^[19],运用于食品、医药等领域时无需添加其他化学物质。与常规光敏剂联合光源照射方法相比(如亚甲蓝-可见光、核黄素-UVA 体系),本研究采用纯光源条件评估光灭活效果。虽然添加光敏剂能够提高灭活效率,但其使用外源光敏剂会带来残留、成本及环保等问题。目前 365、405、450 nm 等安全波长 LED 光源灭活病毒的研究报道日益增多^[12, 20-21],相关灭活机制逐步得到阐明,主要包括直接光化学损伤^[22]和间接活性氧损伤^[23-24]两种途径。然而,目前对于哪种波长的光源灭活效果更优尚无统一定论,缺乏系统性的比较研究。因此,本研究在同一标准化平台下,系统比较 365、405、450 nm 对病毒的灭活动力学响应,以揭示波长-液层厚度-时间的定量关系。本研究综合比较了 3 种波长 LED 光源在不同液面厚度条件下的病毒灭活效果,以 PRV (DNA 病毒)和 Sindbis 病毒 (RNA 病毒)作为代表性模式病毒,发现 3 种光源照射均能实现一定程度的病毒滴度下降。其中,365 nm 光源照射表现出最优性能,在 20 min 低液面处理条件下对两种病毒的滴度下降分别达到 2.31 和 3.63,证明了其应用于光灭活技术的较大潜力。

液面厚度对光灭活效果具有关键影响,本研究显示不同波长光源在该因素上存在显著差异。依据光学原理,波长越短,介质中的吸收与散射越强、穿透性越弱^[25-26]。尽管 365 nm 光源展现出最优的内在灭活效能,其穿透性相对不足,使其灭活效率对液面厚度的变化尤为敏感。该发现提示,在未来将 365 nm 波长用于病毒灭活的实际照射应用中,应充分考虑并严格控制液面厚度,以避免因穿透受限而降低灭活效率。相比之下,长波长光源的单位光剂量效应较弱,但在深层穿透方面具有相对优势。此外,Sindbis 病毒对液面厚度的敏感性最低,这一差异可能与 RNA 病毒与 DNA 病毒在光敏感性与作用机制上的不同有关。

进一步探索了双波长复合光源对病毒灭活效果的影响,并深入阐释了光灭活的作用机制。双波长实验结果显示,365nm+450 nm 和 365nm+405 nm 两种组合的灭活效果介于单一波长和理论叠加效果之间,未表现出预期的协同作用。推断其原因可能在于病毒内源性光敏分子数量有限,当多波长同时作

用时发生光子吸收竞争, 高能光子优先原则使 365 nm 光子具有更高的吸收截面^[27-28]。

验证实验进一步揭示了光灭活的机制, 扫描电子显微镜观察结果表明, 灭活前后病毒颗粒外壳结构完整性基本保持, 未观察到明显的形态变化或蛋白外壳破裂现象, 说明光灭活主要通过分子损伤实现功能性失活。ROS 清除实验证实了氧化损伤的重要作用: 甘露醇处理后灭活效果显著下降 40.77%, 表明羟基自由基在灭活过程中起主导作用; 过氧化氢酶处理后灭活效果下降 10.72%, 显示过氧化氢作为温和氧化剂发挥辅助作用。病毒光灭活主要包括以下两类机制: 第一类为物理结构破坏机制, 热效应导致病毒衣壳或包膜的直接破裂、蛋白变性等显著结构损伤; 第二类为遗传物质破坏机制, 光照产生的 ROS 或其他自由基对核酸等遗传物质造成氧化或链断裂损伤, 从而使病毒失去感染性。扫描电子显微镜观察显示, 经 UVA 辐照后的病毒形态整体完整, 说明灭活作用并非因光照热积累或物理裂解等非特异性结构破坏引起。与此同时, 在 ROS 清除实验中发现, 添加过氧化氢酶(去除 H₂O₂)及甘露醇(清除 OH)后, 病毒灭活效率明显下降, 提示 ROS 生成在病毒功能性损伤过程中发挥了关键作用。由此推测, 本研究的灭活效应主要是通过 ROS 间接氧化破坏病毒遗传物质或关键官能团(如核酸碱基、蛋白内氧化敏感氨基酸残基), 而非直接破坏病毒颗粒的形态结构。值得注意的是, 即使在 ROS 被大幅清除的条件下, 仍存在残余灭活效果, 证明了 365 nm 光子能量足以引发 DNA/RNA 分子的电子激发, 导致胸腺嘧啶二聚体形成等直接光化学损伤机制的独立存在。

本研究存在的潜在局限性主要包括, 所选择的两种指示病毒虽然涵盖了 DNA 和 RNA 病毒 2 种类型, 但未来仍需对更多的临床病毒株进行进一步的效果确认。总之, 本研究基于所建立的 LED 光源光生物灭活技术平台, 首次对 3 种安全波长 LED 光源(365、405、450nm)的灭活效果进行全面比较, 验证了 365 nm 波长照射在 DNA/RNA 病毒灭活效率方面的优势地位, 并探索了其灭活机制。本研究结果为未来在血液安全和人员暴露环境下开发更安全的光灭活技术提供了数据基础。

参考文献:

- [1] NAITO K, SAWADAISHI K, KAWASAKI M. Photobiochemical mechanisms of biomolecules relevant to germicidal ultraviolet irradiation at 222 and 254nm[J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 18217-18226.
- [2] KIM D, KIM S, KANG D. Bactericidal effect of 266 to 279nm wavelength UVC-LEDs for inactivation of Gram positive and Gram negative foodborne pathogenic bacteria and yeasts[J]. Food research international, 2017, 97(1):280-287.
- [3] DE ALMEIDA M, DE ALMEIDA B, SIQUEIRA J, et al. Ultraviolet-C light-emitting device against microorganisms in beauty salons[J]. Pathogens & immunity, 2022, 7(1):49-59.
- [4] YAMANO N, KUNISADA M, NISHIAKI-SAWADA A, et al. Evaluation of acute reactions on mouse skin irradiated with 222 and 235 nm UV-C[J]. Photochemistry and photobiology, 2021, 97(4):770-777.
- [5] KAIJZU S, SUGIHARA K, SASAKI M, et al. Re-Evaluation of rat corneal damage by short-wavelength UV revealed extremely less hazardous property of far-UV-C[J]. Photochemistry and photobiology, 2021, 97(3):505-516.
- [6] SLINEY D, STUCK B. A need to revise human exposure limits for ultraviolet UV-C radiation[J]. Photochemistry and photobiology, 2021, 97(3):485-492.
- [7] ASH C, DUBEC M, DONNE K, et al. Effect of wavelength and beam width on penetration in light-tissue interaction using computational methods[J]. Lasers in medical science, 2017, 32(8):1909-1918.
- [8] BARBORA A, BOHAR O, SIVAN A, et al. Higher pulse frequency of near-infrared laser irradiation increases penetration depth for novel biomedical applications[J]. PLOS ONE, 2021, 16(1):e0245350.
- [9] FINLAYSON L, BARNARD I, MCMILLAN L, et al. Depth penetration of light into skin as a function of wavelength from 200 to 1000 nm[J]. Photochemistry and photobiology, 2022, 98(4):974-981.
- [10] YU E, CHAU J, LEE M, et al. Recyclable and environmentally friendly magnetic nanoparticles with aggregation-induced emission photosensitizer for sustainable bacterial inactivation in water[J]. ACS Nano, 2024, 18(3):1907-1920.
- [11] 闫泳, 郑硕, 毛丽颖, 等. NIR 控制的复合型纳米 MOF 用于耐药菌灭活[J]. 天津科技大学学报, 2023, 38(5):15-22.
- [12] RATHNASINGHE R, JANGRA S, MIORIN L, et al. The virucidal effects of 405nm visible light on SARS-CoV-2

- and influenza A virus[J]. Scientific reports, 2021, 11(1):19470-19479.
- [13] GERCHMAN Y, MAMANE H, FRIEDMAN N, et al. UV-LED disinfection of coronavirus: wavelength effect[J]. Journal of photochemistry and photobiologyB: biology, 2020, 212(1):112044-112053.
- [14] 李双双, 吕佳琦, 李媛,等. 帕布昔利布和氟维司群共载药阳离子脂质体的制备和性质评价[J]. 天津科技大学学报, 2021, 36(4): 8-13.
- [15] RATTANAKUL S, OGUMA K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms[J]. Water Research, 2018, 130(1):31-37.
- [16] WANG Y, WANG Y, WANG Y, et al. Antimicrobial blue light inactivation of pathogenic microbes: state of the art[J]. Drug resistance updates: reviews and commentaries in antimicrobial and anticancer chemotherapy, 2017, 33(1):1-22.
- [17] KOZAK M, MAZIERSKI P, ŻEBROWSKA J, et al. Detailed insight into photocatalytic inactivation of pathogenic bacteria in the presence of visible-light-active multicomponent photocatalysts[J]. Nanomaterials, 2024, 14(5):409-418.
- [18] LI K, RU Y, ZHENG H, et al. Advancements in photodynamic inactivation: a comprehensive review of photosensitizers, mechanisms, and applications in food area[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2025, 24(2):e370127.
- [19] MESQUITA M Q, DIAS C J, NEVES M G, et al. Revisiting current photoactive materials for antimicrobial photodynamic therapy[J]. Molecules: a journal of synthetic chemistry and natural product chemistry, 2018, 23(10): 2424.
- [20] SPUNDE K, RUDEVICA Z, KOROTKAJA K, et al. Bacteria and RNA virus inactivation with a high-irradiance UV-A source[J]. Photochemical & photobiological sciences: official journal of the European photochemistry association and the European society for photobiology, 2024, 23(10):1841-1856.
- [21] WANG Y, HE GX, SANCHEZ-QUETE F, et al. Systematic review and meta-analysis on the inactivation rate of viruses and bacteriophage by solar wavelength radiation[J]. Environmental science & technology, 2025, 59(15):7421-7439.
- [22] HAMBLIN MR, ABRAHAMSE H. Oxygen-independent antimicrobial photoinactivation: type III photochemical mechanism[J]. Antibiotics, 2020, 9(2):53-61.
- [23] WEI M, HE X, LIU N, et al. Role of reactive oxygen species in ultraviolet-induced photodamage of the skin[J]. Cell division 2024, 19(1): 1-11.
- [24] ZHANG S, ZHENG M, YANG G, et al. Sunlight-mediated CaO₂ inactivation of pathogen indicator organisms in surface water system: Roles of reactive species, characterization of pathogen inactivation[J]. Water research, 2023, 233(1): 119756-119762.
- [25] LIU W, ZHOU Z, CHEN L, et al. Imaging through dynamical scattering media by two-photon absorption detectors[J]. Optics express, 2021, 29(19): 29972-29981.
- [26] BATOOL S, NISAR M, MANGINI F, et al. Scattering of light from the systemic circulatory system[J]. Diagnostics, 2020, 10(12):1026-1037.
- [27] DE REGUARDATI S, PAHAPILL J, MIKHAILOV A, et al. High-accuracy reference standards for two-photon absorption in the 680-1050 nm wavelength range[J]. Optics express, 2016, 24(8):9053-9066.
- [28] MAKAROV N, DROBIZHEV M, REBANE A. Two-photon absorption standards in the 550-1600 nm excitation wavelength range[J]. Optics express, 2008, 16(6):4029-4047.