·综　述·

222 纳米紫外线消毒技术研究进展

赵中如[1,2]，郝树彬[3]，温红玲[1,2]

1. 山东大学公共卫生学院卫生检验与检疫学系，济南 250012；
2. 山东省高等学校新发突发传染病防控与生物安全重点实验室，济南 250012；
3. 山东省医疗器械与药品包装检验研究院，济南 250000
通信作者：温红玲，E-mail：wenhongling@sdu.edu.cn

【摘　要】 近年来 222 纳米紫外线（222-nm UVC）作为一种新兴的消毒技术，因其高效、广谱的杀菌特性和潜在的低生物危害性而受到广泛关注。本文系统综述了 222-nm UVC 的光化学作用机制及其杀菌效果，并综合评估该技术的生物安全性，重点关注其对皮肤屏障功能与眼表组织的潜在风险。同时还探讨 222-nm UVC 在应用过程中伴随的臭氧的生成风险，并评述相关的消毒策略及新型消毒设备的研究进展。旨在为该技术的精准化应用提供理论依据；兼顾抗菌效能与人体安全，推动其在院内感染控制及公共卫生危机应对中的转化应用。

【关键词】 消毒技术；222 纳米紫外线；安全性；有效性

Research progress in 222-nm ultraviolet C light for disinfection: a review

ZHAO Zhongru[1,2], HAO Shubin[3], WEN Hongling[1,2] (*1. Department of Health Inspection and Quarantine, School of Public Health, Shandong University, Jinan* 250012, *China*; *2. Shandong Provincial Key Laboratory for Prevention and Control of Emerging Infectious Diseases and Biosafety in Higher Education Institutions, Jinan* 250012, *China*; *3. Shandong Institute of Medical Device and Pharmaceutical Packaging Inspection, Jinan* 250000, *China*)
Corresponding author: WEN Hongling, E-mail: wenhongling@sdu.edu.cn

【Abstract】 As an emerging disinfection technology, 222-nm ultraviolet C light (222-nm UVC) has attracted considerable research interest due to its potent broad-spectrum antimicrobial properties and potentially favorable biosafety profile. This review provides a systematic examination of the photochemical mechanisms mediating the germicidal effects of 222-nm UVC and comprehensively evaluates the biosafety of this technology, with a particular emphasis on potential impacts on cutaneous barrier integrity and ocular surface tissue. Furthermore, we discuss the risk of ozone generation during 222-nm UVC application and critically analyze recent advances in disinfection protocols and device development. By synthesizing current evidence, this review aims to establish a scientific foundation for the precise clinical implementation of this technology and optimize the balance between antimicrobial efficacy and human safety to facilitate the translational applications of this technology in healthcare-associated infection control and public health emergency management.

【Keywords】 disinfection technology; 222-nm ultraviolet C light; safety; effectiveness

紫外线消毒技术因其高效、广谱的杀菌特性，在医疗、公共卫生和日常生活等领域得到了广泛应用。其中，传统的 254 纳米（nm）紫外线以其操作简便和显著的杀菌效果成为主流选择。然而，该波段的紫外线在杀灭病原体的同时，也会造成人体皮肤细胞损伤、诱导嘧啶二聚体的形成，存在潜在的致癌风险。这一局限性促使研究者们不断探索更为安全的紫外线消毒技术。近年来，222 纳米紫外线（222-nm UVC）因其显著改善的生物安全性而受到广泛关注。研究表明，222-nm UVC 不仅能有效杀灭多种病原体，还能显著减少对人类 DNA 的损伤，从而在杀菌效率与生物安全性之间实现更好的平衡。这一发现为紫外线消毒技术的研发提供了新的方向。

1　222-nm UVC 的作用机制和有效性

1.1　222-nm UVC 的作用机制　根据波长（nm）和能量，紫外线可分为 4 个主要区域：100～200 nm 的真空紫外线、200～280 nm 的短波紫外线（UVC）、280～315 nm 的中波紫外线（UVB），以及 315～400 nm 的长波紫外线（UVA）。其中，UVA 和 UVB 能穿透组织深层，可能导致眼部白内障和皮肤癌，而 UVC 则被眼睛和皮肤的外层吸收，并在不断脱落的表皮细胞中发挥作用，相对安全。UVC 在灭活微生物方面展现了巨大潜力[1]。其主要机制是破坏微生物的遗传物质，通过诱导嘧啶二聚

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1146778
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC2604000）；山东大学实验室建设与管理研究项目（sy20241401）
第一作者：赵中如（2000—），在读硕士，研究方向：微生物检验。
收稿日期：2024-12-25　修回日期：2025-07-27　录用日期：2025-08-12
利益冲突：不存在　伦理审查：免除审查　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

体的形成破坏 DNA 和 RNA 的正常结构，进而干扰转录和复制，最终导致细胞功能紊乱[2–3]。此外，UVC 能够抑制与 DNA 修复相关的酶，进一步加剧细胞损伤。有证据表明，UVC 光子可与细胞膜相互作用，氧化脂质中的不饱和脂肪酸，生成醛类或酮类化合物，从而增强其灭活效果[4]。

1.2 222-nm UVC 的有效性 222-nm UVC 的杀菌效果指其消灭病原体的能力，通常以辐照前后细菌数量的对数减少值评估；受多种因素影响，包括辐射剂量、波长、暴露时间以及微生物对 UVC 的敏感性等。根据美国政府工业卫生学家委员会（ACGIH）的建议，对于正常人而言，每日可接受的 222-nm UVC 的辐射暴露限值设定为，眼睛角膜照射<160 mJ/cm^2、皮肤照射则<478 mJ/cm^2。

1.2.1 对流感病毒、冠状病毒的灭活效率 Welch D 等[5] 的研究表明，在 2 mJ/cm^2 的低剂量条件下，222-nm UVC 对雾化流感病毒（H1N1）的灭活效率达到 95%。在 1.7 mJ/cm^2 的剂量条件下，对雾化冠状病毒 HCoV-229E 的灭活效率达到 99.9%。当剂量调整至 1.2 mJ/cm^2 时，222-nm UVC 对冠状病毒 HCoV-OC43 也能达到相同的灭活效率[2]。多项研究数据表明，在特定剂量下，222-nm UVC 展现出对多种呼吸道病毒的广谱杀菌能力[6–10]。

1.2.2 对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、艰难梭菌和大肠杆菌灭菌效果 Buonanno M 等[11] 的研究表明，在 2～150 mJ/cm^2 的辐射剂量下，222-nm UVC 能够使耐甲氧西林金黄色葡萄球菌（MRSA）的数量减少 0.7～4.7 个对数值。当辐射剂量达到 25 mJ/cm^2 时，MRSA 的数量减少 4.5 个对数值。但是，此后减少趋势趋于平缓，出现平台期。Kaiki Y 等[12] 同样的一项体外辐照实验结果显示，在 9～60 mJ/cm^2 的辐照剂量下，MRSA 培养物的数量减少 2.91～5.41 个对数值，在 30 mJ/cm^2 的剂量下，MRSA 的数量减少 4.86 个对数值。Taylor W 等[13] 对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌（MRSA）细胞生长的对数期与稳定期进行体外研究，比较 222-nm UVC 照射后细菌的存活情况。结果显示，无论是处于对数期还是稳定期的 MRSA 培养物，在 222-nm UVC 照射后数量均减少 99% 以上；与稳定期的细胞相比，对数期的 MRSA 培养物表现出更为显著的减少效果，两者相差 10 倍。Goh J C 等[14] 针对铜绿假单胞菌、艰难梭菌和大肠杆菌的 222-nm UVC 照射研究表明，在 540 mJ/cm^2 的剂量下，艰难梭菌达到完全灭菌效果（未检出存活菌落），而铜绿假单胞菌和大肠杆菌的灭活效率相对较低。Narita K 等[15] 的研究结果显示，在受控的实验室环境中，当使用 50 mJ/cm^2 的剂量时，艰难梭菌能够被完全杀灭。而对于铜绿假单胞菌和大肠杆菌，则需要施加更高的剂量才能达到灭菌的效果。Taylor W 等[13] 的研究表明，在 425 mJ/cm^2 的剂量下，艰难梭菌芽孢达到完全灭菌效果。这一发现与其他研究结果相吻合，相较于艰难梭菌，222-nm UVC 在杀灭铜绿假单胞菌和大肠杆菌时需要更高的剂量。Ivanova I 等[16] 的研究表明，222-nm UVC 在 12 mJ/cm^2 的辐照剂量下，大肠杆菌数量减少 4.4 个对数值，当辐照剂量达到或超过 50 mJ/cm^2 时，大肠杆菌的数量减少 6.5 个对数值。在评估大肠杆菌的灭菌效果时，Ivanova I 等[16] 的结果与 Narita K 等[15] 的发现一致，两者均确认消除 99.9% 细菌所需的辐照剂量为 12 mJ/cm^2。当前研究表明，对于大约 2/3 的细菌、细菌芽孢、真菌、病毒及病原生物而言，10 mJ/cm^2 的辐照剂量足以在所有介质中实现 90% 或更高的微生物减少率[2,5,11–16]。当辐照剂量提升至 100 mJ/cm^2 时，几乎所有被检测的病原体均至少减少 3 个对数值[8]。与 254-nm UVC 辐照所需的对数减少剂量相比，222-nm UVC 所需的剂量约为前者的 1.3 倍[8]。

2 222-nm UVC 的安全性

传统低压汞灯产生的 254-nm UVC 具有显著的杀菌效果，但长期暴露会导致细胞核酸发生光二聚化，形成嘧啶二聚体。最常见的嘧啶二聚体包括环丁烷嘧啶二聚体（CPD）和嘧啶酮光产物（6-4PPs），造成人体皮肤、眼睛等组织损伤，可能诱发角膜炎、结膜炎等眼部疾病；加速皮肤老化过程，引发红斑乃至皮肤癌的风险。此外，远紫外线会促使周围环境中的氧气转化为臭氧（O_3）。作为一种化学性质活泼的气体，臭氧已证实能对呼吸系统、心血管系统及中枢神经系统产生不良影响。同时，臭氧还会与空气中的挥发性有机化合物反应，诱导生成超细颗粒物（UFPs），威胁人体健康。而目前的研究结果显示，222-nm UVC 则具有较好的皮肤安全性、眼睛安全性及臭氧安全性。

2.1 皮肤安全

2.1.1 人类皮肤模型 Welch D 等[17] 通过构建三维人体皮肤模型并进行实验测量，发现 UVC 波长与皮肤损伤之间存在显著关联，随着 UVC 波长的增加，表皮损伤程度逐渐加重。然而，相较于传统的杀菌 UVC 波长（254-nm），远 UVC 波长（200～240 nm）则表现出差异性，其并不会引发显著的 DNA 损伤。Buonanno M 等[11] 使用多层人体 3D 皮肤模型模拟表皮和真皮的生理反应，结果表明，在 25～145 mJ/cm^2 的 222-nm UVC 照射下，未在角质形成细胞中诱导出 CPD 和 6-4PPs。

同样，在相同的 222-nm 波长下，500 mJ/cm^2 的高辐照剂量组与假照射对照组相比，在角质层正下方观察到极小的浅表 DNA 损伤，暴露诱导的 6–4PPs 不超过 4%，4% 的角质形成细胞生成 CPD，与日常阳光暴露的结果相比，DNA 损伤更小[11]。此外，在针对人类皮肤实行的红斑诱导实验中，当辐照剂量达到 18 000 mJ/cm^2 时，并未观察到有皮肤红斑的产生[18]。这些研究结果表明，远 UVC 波长（200～240 nm）在皮肤安全性方面表现良好。

由于目前尚未开展长期的系统性人体实验，关于 222-nm UVC 辐射的潜在生物学效应及其作用机制的研究仍存在较大空白。

2.1.2　动物模型

2.1.2.1　短期研究　Fukui T 等[19] 利用兔子伤口作为模型，模拟了人类手术部位的感染情况。使用装配有滤光片的 UVC 设备，将发射光谱限制在 200～230 nm，最大输出波长为 222-nm。500 mJ/cm^2 照射 1 h 的结果显示，筋膜、肌肉和骨骼中出现微量的 CPD，而在关节软骨中则未观察到任何损伤。Buonanno M 等[11] 开展一项综合性的实验研究，采用 Kr-Cl 准分子灯作为光源，并装配了定制的滤光片，通过限制 222-nm 波长以外的光波透射，可显著提升光谱的纯度。以 157 mJ/cm^2 的剂量照射 477 只正常未受伤的小鼠皮肤。结果显示，角质形成细胞中未出现 CPD 和 6–4PPs 的损伤。Fukui T 等[19] 在兔子模型中发现，CPD 在脂肪组织中存在显著。这一现象可能归因于脂肪组织特有的构成成分，以及该组织相对缺乏高效的 DNA 损伤防护机制。此观察结果与 Ponnaiya B 等[20] 及 Narita K 等[21] 的研究报道相吻合。研究还发现，在 UVC 照射后 24 h，脂肪组织中的 CPD 阳性细胞数量显著下降至几乎可忽略不计的水平。这一变化可能反映了生物体内 DNA 损伤修复机制的活跃作用。表明即便是在高剂量的 222-nm UVC 单次或重复照射下诱导产生的 CPD，也可能通过生物体的自我修复机制得到恢复，且其潜在危害性可能并不显著。

2.1.2.2　长期研究　一些研究深入探讨长达数周乃至数月的长期远 UVC 暴露对动物模型所产生的影响，并得到一些初步结果。Welch D 等[22] 将无毛白化小鼠暴露于 400 mJ/cm^2 的 222-nm UVC 中，每周 5 d，经过 66 周的慢性暴露后，未观察到任何致癌性皮肤变化或其他异常。同样，Yamano N 等[23] 在 Xpa 基因敲除的无毛白化小鼠中进行周期 15 w 的长期暴露实验，也未发现任何致癌性皮肤变化。相比之下，在暴露于 UVB 的对照组中，每只小鼠均观察到多个肿瘤。此外，在美国政府工业卫生学家委员会（ACGIH）推荐的远紫外线暴露剂量下，对无毛小鼠连续暴露 65 w 的结果显示，未发现皮肤癌增加、皮肤异常生长或偶然的皮肤病理学发现的证据[22]。Narita K 等[21] 以 450 mJ/cm^2 的辐照剂量将正常的 HosHr–1 小鼠实行每日一次的辐照处理，持续 10 d。在此实验条件下，未在受照小鼠细胞中检测到 CPD 的表达。在皮肤安全方面，相比于传统的 254-nm UVC，222-nm UVC 作为杀菌剂的安全性更高[2,6,11]。根据当前的 ACGIH 暴露指南，尚无证据表明 222-nm UVC 会造成皮肤伤害或引发不适感。尽管现有的证据均一致支持 222-nm UVC 对人体皮肤的安全性，但为了更精确地界定其在安全消毒应用中的适用范围，仍需通过进一步实验明确其具体的使用阈值。

2.2　眼部安全　与皮肤研究相比，关于 222-nm UVC 暴露对眼部安全的研究相对较少。紫外线诱导的角膜或结膜炎症损伤分别称为光性角膜炎或光结膜炎，两者均会引起轻度到重度不适。Sliney D H 等[24] 通过自我实验，在单眼暴露后检测光性角膜炎的发生情况。当辐照剂量低于当前的暴露指南所设定的安全水平时，无法通过检测观察到显著变化；然而，在相对较高的辐照剂量条件下，实验者确实感受到了刺痛感，泪膜的自然蒸发速度加快。远紫外光子有可能会破坏泪膜表层脂质分子的化学键，致使其分解，从而加剧泪膜的蒸发速度。因此，有必要继续进行人体研究以评估敏感个体在暴露于远紫外线后可能出现的眼部损伤。Kaidzu S 等[25] 针对大鼠眼睛的研究显示，诱发角膜损伤所需的最小 UVC 剂量远高于当前推荐的监管限值。此外，Kaidzu S 等[25] 还在啮齿动物模型中，就 222-nm UVC 以及其他具有不同阈值的紫外线波长对光性角膜炎的发生情况进行深入研究。在 222-nm 波长下，当辐照剂量达到 1 500 mJ/cm^2 时，出现浅层的角膜光化学损伤（CPD）；当辐照剂量不超过 3 500 mJ/cm^2 时，则未发现有光性角膜炎的迹象[25–27]。近期，一项关于长期远紫外线暴露对人体眼部安全性的原位研究结果显示，在经过长达 12 个月的暴露后，未观察到任何不良影响出现[28]。另一项长期研究采用无毛白化小鼠作为实验对象，通过每周 3 次、每次剂量为 500 mJ/cm^2 的远紫外线照射，持续进行 10 w 的观察，在此期间并未观察到小鼠眼部出现任何不良影响[23]。

2.3　臭氧安全　臭氧已被科学证实会对人体的呼吸系统、心血管系统及中枢神经系统产生不良影响，并已制定了暴露限值。臭氧的浓度通常以微克每立方米（μg/m^3）为单位。美国政府工业卫生学家会议（ACGIH）限制久坐工作的空气中臭

氧阈值(TLV)为 200 μg/m^3，而一天内剧烈运动工作的阈值为该值的一半(100 μg/m^3)[29]。

2.3.1 臭氧生成 相较于长波紫外线 UVA(315～400 nm)，波长在 240 nm 以下的短波紫外线具有更高的臭氧生成潜力。然而，关于 222-nm UVC 在实际应用中产生及消散臭氧分子的效率问题，目前仍认知不足[30–31]。臭氧的产生效率(即氧气吸收紫外线辐射转化为臭氧的效率)在很大程度上依赖于紫外线的波长，且这一效率在大约 160 nm 的波长处达到峰值，随着波长的逐步增加，臭氧的产生效率呈现出急剧下降的趋势。臭氧的吸收峰值恰好对应于低压汞灯的峰值波长，即 254-nm。在这一波长下，臭氧的吸收会导致其自身的分解反应，进而使得空气中的臭氧浓度有所降低[31]。Peng Z 等[32] 通过两项独立研究，深入探讨现实生活环境中远紫外线使用所引发的臭氧生成情况，其中一项在酒店房间内、另一项则在相对封闭的办公室环境中。在酒店房间的测试中，开启远紫外线灯后，室内臭氧浓度上升(11.4±1.6)μg/m^3；而在办公室环境的测试中，该增量为(10.2±1.8)μg/m^3[32]。这两项研究所得出的臭氧增量均值均接近 10 μg/m^3，远低于当前各项监管标准所设定的阈值。考虑到现实应用中远紫外线的使用量，这一数值可视为上限估计。一是研究中采用的远紫外线剂量已超出 ACGIH 所推荐的限值；二是测试房间均具备较好的密闭性，而远紫外线设备预期将主要应用于空气交换率更高的公共室内空间。因此，在实际生活场景中，远紫外线使用所导致的臭氧水平不会超过 10 μg/m^3。

2.3.2 臭氧与现有空气污染物之间相互作用 关于臭氧与挥发性有机化合物(VOCs)之间的相互作用，已有实验测量和数值模拟研究提供了相关数据[33–34]。在臭氧浓度较低(<100 μg/m^3)的情况下，臭氧与 VOCs 的反应速率较低。远紫外线诱导产生的臭氧导致显著超细颗粒物(UFPs)生成的可能性较小。Kalliomäki P 等[35] 在 17.5～289.0 nm 粒径范围内监测空气传播 UFPs 的浓度。研究结果表明，相较于紫外线生成的臭氧，通风等其他因素对于室内 UFPs 浓度的影响更为显著。因此，可以得出结论，在远紫外线灯产生的臭氧浓度极低的情况下，其对室内空气质量及 UFPs 生成的影响相对有限。

3 UVC 的消毒策略和新型消毒设备

3.1 UVC 消毒策略 紫外线消毒技术可与其他消毒策略协同应用，以强化其消毒效果[36]。采用低剂量紫外线照射(或缩短紫外线暴露时长)与化学消毒剂结合使用的综合策略已受到广泛关注。这种联合应用的基础在于，每种消毒方法均拥有独特的作用机制及分子作用靶点，相较于单独应用，能够产生互补的消毒效果[37]。过氧化氢蒸气或气态臭氧与 UVC 照射的联合使用，已被证实能有效增强对艰难梭菌的灭活能力[38]。在采用 UVC 光预处理 5 min 后，再实行过氧化氢消毒，能够显著提升医院病房墙面上甲氧西林耐药金黄色葡萄球菌、耐万古霉素肠球菌及艰难梭菌的灭活效率[39]。紫外线照射还可利用反射面或反射结构提升消毒效率。研究显示，消毒反应器材料的反射性会对污染物表面各部位接收到的 UVC 剂量产生影响，这一特性有效强化了紫外线对难以直接照射的阴影区域的消毒效能[40]。此外，通过结合使用反光涂料和加湿器，UVC 消毒的有效性可进一步提升约 20%[41]。这些发现为优化 UVC 消毒技术提供了科学依据，展示了多种策略综合应用在实际操作中的潜力。

3.2 新型消毒设备 在 COVID-19 大流行期间，自动 UVC 技术设备在封闭区域(医院、工作办公室、学校、购物中心和机场)为对抗病原体传播提供了支持，同时减少了对人工监督和操作的依赖。经验证实，AVA 紫外线消毒机器人对 SARS-CoV-2 病毒的杀灭率可达 99.99%[36]。UVD 机器人在有效保障机场及运输站等场所旅客的安全与健康的同时，能够有效灭活包括 MRSA 和艰难梭菌在内的多种病原体，灭活率达 99.99%[42]。部分 UVC 机器人能够与其他消毒策略协同作业。例如，TMiRob 和 DR1001 机器人结合 UVC 灯与过氧化氢的双重消毒模式[36]。机器人 Y–C2 根据操作员的要求可以使用 3 种不同的技术消毒，即冷等离子体、过氧化氢和 UVC 射线。这些自动 UVC 技术设备的多样化与智能化应用，不仅提升了公共卫生水平，也预示着未来消毒技术在自动化、高效化与综合化方面的发展趋势。

为了全面了解 222-nm UVC 对人体组织的生物学效应，深入探究其作用机制及潜在风险至关重要。未来的研究需突破对传统紫外线认知的局限，进一步挖掘包括 DNA 单链断裂(SSB)、双链断裂(DSB)、DNA–DNA 及 DNA–蛋白质交联等新型生物学效应机制，并评估关键发色团在缓解这些效应中的作用机制，同时探讨损伤传递的潜在风险。研究还需聚焦于最佳杀菌剂量的确定、标准化评估体系的开发，以及深入分析长期慢性暴露对皮肤和眼睛的影响。此外，泪膜的防护效果及个体差异的精确测量也亟待解决。在应用方面，222-nm UVC 技术有望广泛应用于公共卫生、医疗、食品和制药行业的空气净化和表面消毒。未来，结合智能控制和便捷设备，UVC 技术将在消毒机器人、家电和个性化防护设备中得到普及。

此外，技术的集成与智能化将提升其消毒效率。未来研究也需关注其环境影响，推动绿色、可持续的发展。通过这些多维度的探索，222-nm UVC 技术将为公共卫生和个人防护提供更全面的解决方案。

数据可用性声明　本研究未生成新的数据

参考文献

[1] Yin R, Dai T H, Avci P, et al. Light based anti-infectives: ultraviolet C irradiation, photodynamic therapy, blue light, and beyond[J]. Current Opinion in Pharmacology, 2013, 13(5): 731-762.

[2] Buonanno M, Welch D, Shuryak I, et al. Far-UVC light (222-nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 10285.

[3] Chevremont A C, Farnet A M, Sergent M, et al. Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs[J]. Desalination, 2012, 285: 219-225.

[4] Hadi J, Dunowska M, Wu S Y, et al. Control measures for SARS-CoV-2: a review on light-based inactivation of single-stranded RNA viruses[J]. Pathogens, 2020, 9(9): 737.

[5] Welch D, Buonanno M, Grilj V, et al. Far-UVC light: a new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2752.

[6] Panzures A. 222-nm UVC light as a skin-safe solution to antimicrobial resistance in acute hospital settings with a particular focus on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and surgical site infections: a review[J]. Journal of Applied Microbiology, 2023, 134(3): lxad046.

[7] Görlitz M, Justen L, Rochette P J, et al. Assessing the safety of new germicidal far-UVC technologies[J]. Photochemistry and Photobiology, 2024, 100(3): 501-520.

[8] Hessling M, Haag R, Sieber N, et al. The impact of far-UVC radiation (200-230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes–a collection and analysis of a hundred years of data[J]. GMS Hygiene and Infection Control, 2021, 16: Doc07.

[9] Bhardwaj S K, Singh H, Deep A, et al. UVC-based photoinactivation as an efficient tool to control the transmission of coronaviruses[J]. Science of the Total Environment, 2021, 792: 148548.

[10] Brenner D J. Far-UVC light at 222-nm is showing significant potential to safely and efficiently inactivate airborne pathogens in occupied indoor locations[J]. Photochemistry and Photobiology, 2023, 99(3): 1047-1050.

[11] Buonanno M, Ponnaiya B, Welch D, et al. Germicidal efficacy and mammalian skin safety of 222-nm UV light[J]. Radiation Research, 2017, 187(4): 493-501.

[12] Kaiki Y, Kitagawa H, Hara T, et al. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* contamination of hospital-use-only mobile phones and efficacy of 222-nm ultraviolet disinfection[J]. American Journal of Infection Control, 2021, 49(6): 800-803.

[13] Taylor W, Camilleri E, Craft D L, et al. DNA damage kills bacterial spores and cells exposed to 222-nanometer UV radiation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2020, 86(8): e03039-19.

[14] Goh J C, Fisher D, Hing E C H, et al. Disinfection capabilities of a 222-nm wavelength ultraviolet lighting device: a pilot study[J]. Journal of Wound Care, 2021, 30(2): 96-104.

[15] Narita K, Asano K, Naito K, et al. Ultraviolet C light with wavelength of 222-nm inactivates a wide spectrum of microbial pathogens[J]. Journal of Hospital Infection, 2020, 105(3): 459-467.

[16] Ivanova I, Svilenska T, Kurz B, et al. Improved spectral purity of 222-nm irradiation eliminates detectable cyclobutylpyrimidine dimers formation in skin reconstructs even at high and repetitive disinfecting doses[J]. Photochemistry and Photobiology, 2022, 98(5): 1149-1156.

[17] Welch D, Aquino de Muro M, Buonanno M, et al. Wavelength-dependent DNA photodamage in a 3-D human skin model over the far-UVC and germicidal UVC wavelength ranges from 215 to 255 nm[J]. Photochemistry and Photobiology, 2022, 98(5): 1167-1171.

[18] Eadie E, Barnard I M R, Ibbotson S H, et al. Extreme exposure to filtered far-UVC: a case study[J]. Photochemistry and Photobiology, 2021, 97(3): 527-531.

[19] Fukui T, Niikura T, Oda T, et al. Safety of 222-nm UVC irradiation to the surgical site in a rabbit model[J]. Photochemistry and Photobiology, 2022, 98(6): 1365-1371.

[20] Ponnaiya B, Buonanno M, Welch D, et al. Far-UVC light prevents MRSA infection of superficial wounds *in vivo*[J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192053.

[21] Narita K, Asano K, Morimoto Y, et al. Chronic irradiation with 222-nm UVC light induces neither DNA damage nor epidermal lesions in mouse skin, even at high doses[J]. PLoS One, 2018, 13(7): e0201259.

[22] Welch D, Kleiman N J, Arden P C, et al. No evidence of induced skin cancer or other skin abnormalities after long-term (66 week) chronic exposure to 222-nm far-UVC radiation[J]. Photochemistry and Photobiology, 2023, 99(1): 168-175.

[23] Yamano N, Kunisada M, Kaidzu S, et al. Long-term effects of 222-nm ultraviolet radiation C sterilizing lamps on mice susceptible to ultraviolet radiation[J]. Photochemistry and Photobiology, 2020, 96(4): 853-862.

[24] Sliney D H, Stuck B E. A need to revise human exposure limits for ultraviolet UV-C radiation[J]. Photochemistry and Photobiology, 2021, 97(3): 485-492.

[25] Kaidzu 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.

[26] Kaidzu S, Sugihara K, Sasaki M, et al. Safety evaluation of far-UV-C irradiation to epithelial basal cells in the corneal limbus[J]. Photochemistry and Photobiology, 2023, 99(4): 1142-1148.

[27] Kaidzu S, Sugihara K, Sasaki M, et al. Evaluation of acute corneal damage induced by 222-nm and 254-nm ultraviolet light in Sprague–Dawley rats[J]. Free Radical Research, 2019, 53(6): 611-617.

[28] Sugihara K, Kaidzu S, Sasaki M, et al. One-year ocular safety observation of workers and estimations of microorganism inactivation efficacy in the room irradiated with 222-nm far ultraviolet-C lamps[J].

Photochemistry and Photobiology, 2023, 99(3): 967-974.

[29] ACGIH. 2020 TLVs® and BEIs®: threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices[C]. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2020: 48.

[30] Brenner D J. The public-health significance of far-UVC-induced indoor ozone and its associated secondary chemistry[J]. Photochemistry and Photobiology, 2024, 100(5): 1186-1190.

[31] Claus H. Ozone generation by ultraviolet lamps[J]. Photochemistry and Photobiology, 2021, 97(3): 471-476.

[32] Peng Z, Day D A, Symonds G A, et al. Significant production of ozone from germicidal UV lights at 222-nm[J]. Environmental Science and Technology Letters, 2023, 10(8): 668-674.

[33] Rosales C M F, Jiang J L, Lahib A, et al. Chemistry and human exposure implications of secondary organic aerosol production from indoor terpene ozonolysis[J]. Science Advances, 2022, 8(8): eabj9156.

[34] Wainman T, Zhang J, Weschler C J, et al. Ozone and limonene in indoor air: a source of submicron particle exposure[J]. Environmental Health Perspectives, 2000, 108(12): 1139-1145.

[35] Kalliomäki P, Sobhani H, Stratton P, et al. Ozone and ultra-fine particle concentrations in a hotel quarantine facility during 222-nm far-UVC air disinfection[J/OL]. (2023-10-02)[2024-10-26]. https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2023.09.29.23296366v1.

[36] Pereira A R, Braga D F O, Vassal M, et al. Ultraviolet C irradiation: a promising approach for the disinfection of public spaces?[J]. Science of the Total Environment, 2023, 879: 163007.

[37] Zhang T Q, Wang T, Mejia-Tickner B, et al. Inactivation of bacteria by peracetic acid combined with ultraviolet irradiation: mechanism and optimization[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 54(15): 9652-9661.

[38] Anderson D J, Moehring R W, Weber D J, et al. Effectiveness of targeted enhanced terminal room disinfection on hospital-wide acquisition and infection with multidrug-resistant organisms and *Clostridium difficile*: a secondary analysis of a multicentre cluster randomised controlled trial with crossover design (BETR Disinfection)[J]. The Lancet Infectious Diseases, 2018, 18(8): 845-853.

[39] Wong T, Woznow T, Petrie M, et al. Postdischarge decontamination of MRSA, VRE, and *Clostridium difficile* isolation rooms using 2 commercially available automated ultraviolet-C–emitting devices[J]. American Journal of Infection Control, 2016, 44(4): 416-420.

[40] de Sternberg Stojalowski P, Fairfoull J. Comparison of reflective properties of materials exposed to ultraviolet-C radiation[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2021, 126: 126017.

[41] Guettari M, Gharbi I, Hamza S. UVC disinfection robot[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(30): 40394-40399.

[42] Pandya V S, Morsy M S M, Hassan A A H A A, et al. Ultraviolet disinfection (UV-D) robots: bridging the gaps in dentistry[J]. Frontiers in Oral Health, 2023, 4: 1270959.