

远紫外线技术在公共交通疫情防控中的应用*

孙文俊^{1**,2} 秦思刚³ 韦婷婷^{2,4}

(1. 清华大学环境学院, 100084, 北京; 2. 清华苏州环境创新研究院, 215163, 苏州;

3. 青岛鸿裕吉轨道交通装备有限公司, 266104, 青岛;

4. 苏州沃特环保科技有限公司, 215163, 苏州//第一作者, 副研究员)

摘要 基于目前我国城市公共交通系统疫情防控消杀需求,从 Far UV-C(远紫外线)的消毒灭活原理及效果、Far UV-C 消杀有效性研究、Far UV-C 对皮肤和眼睛的安全无害原理、Far UV-C 对人体安全性研究等方面分析了 Far UV-C 技术的人机共存式消杀潜力。从安全阈值、O₃ 产生量的控制及其他技术要求等方面简述了 Far UV-C 技术的消毒应用现状,从 Far UV-C 消毒灯-表面消毒、Far UV-C 消杀通道-表面消毒及 Far UV-C 消毒过滤器-空气气溶胶消毒等方面分析了 Far UV-C 技术的消毒应用前景,并提出了该技术在消毒应用中的潜在问题。

关键词 公共交通; 疫情防控; 远紫外线技术

中图分类号 TN23; R184.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.032

Application Prospect of Far UV-C Technology in Public Transportation Epidemic Prevention and Control

SUN Wenjun, QIN Sigang, WEI Tingting

Abstract In view of the current epidemic prevention and control disinfection requirements for public transportation system in China, the application potential and prospect of human-machine co-existence disinfection is analyzed from aspects including Far UV-C (ultraviolet-C) disinfection principle and effect, Far UV-C disinfection effectiveness research, Far UV-C eye and skin safety nontoxicity principle, Far UV-C human body safety research. The Far UV-C technology disinfection application status is briefly introduced from technical aspects such as safety threshold and O₃ production amount control. The application prospect of Far UV-C technology disinfection is analyzed in terms of Far UV-C disinfection light-surface disinfection, Far UV-C disinfection passage-surface disinfection, and Far UV-C disinfection filter-air dissolver disinfection, and the potential problems of the technology in disinfection application

are given.

Key words public transport; epidemic prevention and control; Far UV-C technology

First-author's address School of Environment, Tsinghua University, 100084, Beijing, China

一旦某座城市出现疫情,公共交通系统首当其冲,轻则限制出行,重则停运封闭。城市公共交通系统的正常运作是维持疫情期间生产生活、应急救援等工作的重要保障,因此需要安全高效的消毒杀菌(以下简称“消杀”)手段来实现人机共存式防疫。Far UV-C(远紫外线)技术,即 200~230 nm 波段的短波 UV(紫外线),是近年来受到高度关注的既能杀菌消毒又对人体安全无害的热点技术^[1],或将成为城市公共交通领域常态化防控的最理想手段。

1 城市公共交通系统疫情防控消杀需求

城市公共交通系统包括道路公共交通和轨道交通,具有点多、线长、面广、客流密集及空间封闭的特点,若管理不慎容易成为传染病疫情传播通道,导致大面积、多区域、群体性交叉感染。因此,需在科学防疫中同时做到“隔离阻断”和“交流通达”,其应急管理决策和安防防控尤其重要。山东省在 2020 年出台了《城市公共交通重大呼吸道传染病疫情防控措施》^[2],提供了重大呼吸道传染病突发时期城市公共交通疫情防控工作的主要应对措施。文献[3]提出了一种面向传染病疫情防控的公共交通运行决策支持框架,基于公共交通大数据和多源数据相融合等的数据库设计不同功能模块的算法模型,可应用于疫情不同阶段的客流分析、感染者追溯分析等。文献[4]以武汉市公共交通为

* 国家自然科学基金面上项目(51778323)

** 通信作者

研究对象,对其应对疫情挑战的运营策略和相关措施进行了研究。文献[5]研究了传染性疾病如何在多维度的交通网络(包括本地通勤交通网络和远程航空运输网络)进行传播。对于疫情消杀防控,主要有UV、O₃和消毒液消毒等方式,具体应用见表1。与其他技术相比,Far UV-C消毒最明显的优势在于安全性,其次可持续开启并发挥杀菌有效性。对于经济性,Far UV-C技术的主要成本在于产品本

身,其短期部署可以有效预防并阻断病毒传播促使社会经济复苏;长期可作为公共设施基础(不限于公共交通系统)改造设计来部署,从而节省日常人工消毒成本。因Far UV-C技术具有消杀可控性和灵活性,且不受应用环境限制,长远来看较其他消杀方式更具有经济适用性,亦能满足公共交通系统疫情防控消杀需求。

表1 常用的消毒方式对比
Tab.1 Comparison of commonly used disinfection methods

消毒方式	应用环境	潜在危害	杀菌效果	成本构成
消毒液	空间消毒后至少需通风30 min 可用	试剂残留风险	单次有效,不能长久维持	消毒液、人员防护耗材、人工等的费用
O ₃	无人密闭环境,消毒后通风30~60 min 可用	臭氧泄漏对人体造成伤害	非持续开启不能持续有效	O ₃ 发生器费用、每日电费
传统UV	无人环境,消毒后至少通风30 min 可用	人员误照有健康损伤	非持续开启不能持续有效	UV产品费用、每日电费
Far UV-C	消毒时不影响人员正常使用	暂无	可持续开启持续有效	Far UV-C产品费用、每日电费

2 Far UV-C 技术的人机共存式消杀潜力

2.1 Far UV-C 的消毒灭活原理及效果

UV光谱是一段比可见光波长更短、能量更高的电磁辐射波段,分为UV-A(波长为315~400 nm)、UV-B(波长为280~315 nm)和UV-C(波长为100~280 nm)三大类(见图1)。其中,UV-C可以细分为UVGI(杀菌UV)(波长为250~280 nm)、Far UV-C(波长为200~230 nm)和VUV(真空UV)(波长为100~200 nm)。Far UV-C波段波长短、能量高,在短时间内可以迅速破坏微生物机体(细菌、病毒等病原体)细胞中的分子结构如DNA(脱氧核

糖核酸)和RNA(核糖核酸),具备广谱杀菌效果,从而可以应用于水、空气和物体表面消毒。另外,Far UV-C的短波长更容易被核酸和蛋白质吸收,导致两种生物分子类型的光化学损伤且无法修复。通常认为传统UV(波长为254 nm)的消毒能力比Far UV-C更强。

2.2 Far UV-C 消杀有效性研究

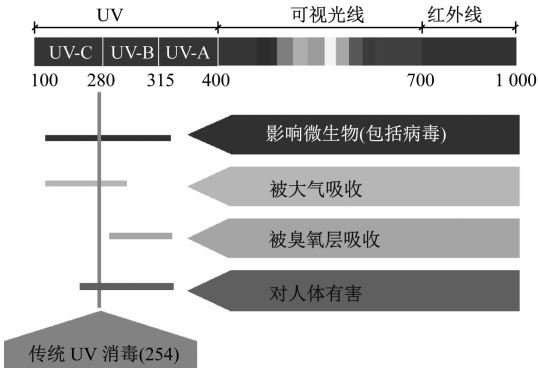
Far UV-C消杀对流感病毒、冠状病毒等杀菌的有效性研究见表2。由表2可见:Far UV-C消杀的效果良好。

表2 Far UV-C 消杀有效性研究
Tab.2 Far UV-C disinfection effectiveness research

病毒类型	Far UV-C 剂量与效果	参考文献
H1N1(人类猪型流感)病毒	1.6 mJ/cm ² 剂量下的灭活率为95%	[6]
冠状病毒(β属到α属)	1.2~1.7 mJ/cm ² 剂量下的灭活率为99.7%	[7]
SARS-CoV-2(新型冠状病毒)	1.0 mJ/cm ² 和3.0 mJ/cm ² 剂量下的灭活率分别为88.5%和99.7%	[8]
SARS-CoV-2(新型冠状病毒变体毒株)	灭活作用与原毒株无明显差异	[9]

2.3 Far UV-C 对皮肤和眼睛的安全无害原理

图2和图3展现了不同波长的UV对人体皮肤和眼角膜的辐射穿透效果。由图2和图3可知:波



注:图中数字为波长值,单位为nm。

图1 UV-A、UV-B、UV-C在电磁辐射波段的范围及定义
Fig.1 Ranges and definition of UV-A, UV-B, UV-C in electromagnetic radiation band

长为 222 nm 的 Far UV-C 不能穿透皮肤角质层和眼睛角膜上皮^[10]。这是因为皮肤损伤只有在 UV 穿透皮肤表皮层(角质层、颗粒层和棘层)辐射到基底层损伤 DNA 才会形成。而 Far UV-C 波长较传统 UV 更短,会被皮肤细胞在生命周期结束时构成的角质层强烈吸收,在完成消杀剂量下无法穿透皮肤组织^[11]。对于眼睛,角膜厚约 500 ~ 600 μm ,角膜外侧覆盖有厚约 7 mm 的泪膜, Far UV-C 同样无法穿透^[12]。文献[13]指出对于现实中存在的皮肤敏感个体,其皮肤角质层厚度与正常人无显著差异,同样地对于干眼症患者而言其泪膜厚度也与正常人无异,不存在暴露 Far UV-C 辐射风险。而细菌和病毒的尺寸通常小于 1 μm , Far UV-C 能在短时间内破坏细菌、孢子体,以及病毒中的蛋白与核酸结构,令病原体失去活性无法再生^[14]。

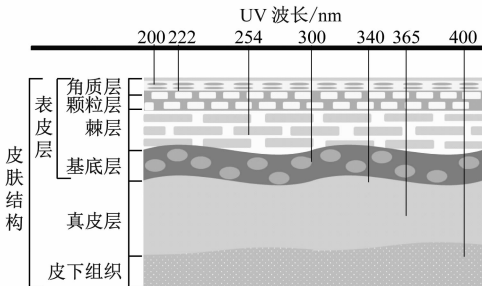


图2 UV 对人体皮肤的辐射示意图

Fig.2 Diagram of UV radiation on human skin

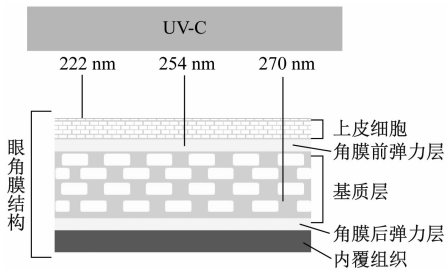


图3 UV 对人体眼角膜的辐射示意图

Fig.3 Diagram of UV radiation on human cornea

2.4 Far UV-C 对人体安全性研究

Far UV-C 对人体安全性的研究以小鼠或皮肤模型试验为主,研究文献有限,部分研究内容见表 3。由表 3 可见:在安全阈值下滤光后的 Far UV-C 对人体无害。

综上, Far UV-C 技术在防疫期间实现人机共存式消杀基本上是可行的。

表 3 Far UV-C 消杀对人体安全性的研究结果
Tab.3 Research results of Far UV-C disinfection affecting human body safety

辐射部位	主要波长/nm	评定结果	参考文献
人体细胞模型	207	安全	[11]
人体皮肤	97% 的波长 ≤ 250 (未滤光)	不安全	[15]
小鼠皮肤	222(滤光)	安全	[16]
小鼠皮肤	222(滤光)	安全	[17]
小鼠皮肤	222(滤光)	安全	[18]
小鼠皮肤	222(滤光)	安全	[19]
人体皮肤	222(滤光)	500 mJ/cm^2 剂量下安全	[20]
小鼠皮肤和眼睛	222(滤光)	安全	[21]
人体皮肤模型	222(未滤光)	23 mJ/cm^2 下不安全	[22]
人体皮肤模型	222(滤光)	23 mJ/cm^2 下安全	[22]
小鼠眼睛	222(滤光)	600 mJ/cm^2 下安全	[23]

3 Far UV-C 技术在公共交通疫情防控中的应用前景

3.1 Far UV-C 技术的消毒应用现状

GB 28235—2020《紫外线消毒器卫生要求》^[24]将 GB 28235—2011《紫外线空气消毒器安全与卫生标准》^[25]中对 UV 光源波段的要求从中心波长 253.7 nm 更新为波长为 200 ~ 280 nm 的 UV-C 波段 UV,且 GB 28235—2020 下 UV 光源不再仅限于低压汞灯,还有 UV-LED(紫外线-发光二极管)、氙灯准分子灯均可作为 UV 光源,这说明 Far UV-C 技术或是未来消毒领域的重要发展方向。需要注意的是,具有“对人体友好”特征的 Far UV-C 是波长为 222 nm 的 UV,需要对光源进行滤光,以阻止波长为 222 nm 以外的有害波长^[15,19,22]。除此之外,需重点考虑 Far UV-C 技术在公共交通疫情防控中的应用。

1) 安全阈值。ACGIH(美国政府工业卫生学家会)^[26]、ICNIRP(国际非电离辐射保护委员会)^[27]对波长为 222 nm Far UV-C 设置的安全阈值为 23 mJ/cm^2 (每天暴露时间为 8 h)。但在 2020 年 ACGIH 发布的 UV 安全阈值“预期变更公告”中首次将波长 300 nm 以下眼睛和皮肤的限值分离,即将现在施行的波长为 222 nm 的阈值 23 mJ/cm^2 (不区分眼睛和皮肤)修正为 161 mJ/cm^2 (眼睛)和 479 mJ/cm^2 (皮肤)。对于安全阈值是否可以提高,需要

大量的实质性研究来证明。文献[20,23]使用超出现有安全阈值的辐射强度($500 \sim 600 \text{ mJ/cm}^2$)进行皮肤和眼睛的照射试验,结果表明仍对人体安全,但该研究并非由专业部门组织发布,仍需更多的研究数据来支撑。故在应用过程中,需以最保守的安全阈值为设计基础,同时需综合考虑各方面因素和实际场景是否在此基础上对安全阈值进行调整,以实现安全高效的病毒消杀。

2) O_3 产生量的控制。另一个与 Far UV-C 应用相关的安全问题是产生 O_3 的可能性。 O_3 已被证明会影响呼吸和神经系统。对于气态 O_3 的接触限值,政府和相关责任部门制定的气相 O_3 密度限值要求为 $0.05 \sim 0.10 \text{ mg/m}^3$ 以下,GB 19258—2012《紫外线杀菌灯》^[28]规定的 UV 灯 O_3 阈值为 0.05 g/kWh ,并对 O_3 的测试方法作了规定。Far UV-C 光源产生 O_3 的原因主要有两种:一是作为光源的准分子灯灯管外表面在高压下产生电晕放电产生 O_3 ;二是短波 UV(波长 $\leq 242 \text{ nm}$)光子作用于氧分子产生 O_3 ,同时 O_3 也在光子作用下分解,即循环的光化学反应产生 O_3 。前者 O_3 产生量与光源的结构和功率有关,后者与发射光谱、功率、安装环境、空气循环和交换率等有关。因此,在实际应用过程中,光源制造商及设计人员需要考虑灯具设计、发射光谱、灯具功率、灯具占空比、房间容积、空气循环和空气交换率等指标来验证光源是否存在 O_3 风险。

3) 其他技术要求。如 Far UV-C 光源的安装位

置、光源密度等的确定,需要结合消杀范围等具体需求,利用空气消毒 UV 辐射流场模拟技术进行合理化布置,同时在产品材料的使用方面,需要应用新型抗 UV 辐射材料。

3.2 Far UV-C 技术的消毒应用场景

如图4所示,在如 SARS-CoV-2 等病原体潜伏或活跃期间,乘客在公共交通出行场所中主要会通过交谈(空气气溶胶传播)、触摸物品(表面接触传播)等途径形成交叉感染,而 Far UV-C 技术的部署则可以有效预防及阻断病毒的传播作用,其应用示例见图5,具体可以分为以下3种类型:

1) Far UV-C 消毒灯-表面消毒。在电梯按钮、刷卡器等位置直接安装 Far UV-C 消毒灯,对其表面进行照射消毒,避免因触摸、接触而引起的病毒传播。此场景下, Far UV-C 消毒灯的使用面积较小,但使用频率高,可设计小功率光源消杀模块进行部署。

2) Far UV-C 消杀通道-表面消毒。Far UV-C 消杀通道是指将 Far UV-C 光源部署于安检门上,形成安全消杀通道。将其部署于城市轨道交通出入口、高速铁路进站口、航站楼进站口等位置,主要对进站人员体表进行消毒,相当于切断病毒传播源头。此场景下, Far UV-C 光源集中对通道内区域进行消毒,消杀通道可设计成移动式消毒仓,占地面积小,易于部署实施。

3) Far UV-C 消毒过滤器-空气气溶胶消毒。Far UV-C 消毒过滤器是指在通风系统通道内部署



图4 公共出行场所中感染病毒的途径

Fig.4 Viral infection paths in public space

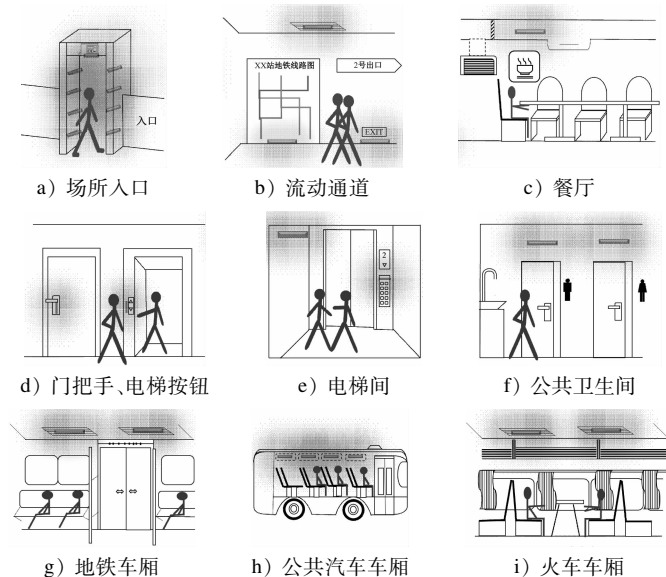


图5 Far UV-C 技术应用于公共出行场所的场景

Fig.5 Application scenarios of Far UV-C technology in public space

Far UV-C 光源,通过空气循环系统对流动空气进行杀菌过滤。以相对密闭、人流量大的火车、城市轨道交通车厢,以及半封闭式的公共汽车车厢为例,除在扶手、走道设置 Far UV-C 消毒灯外,还可配套设置 Far UV-C 安全消毒过滤器,在增加空气流动的同时进行空气过滤,有效降低病毒在空气中的传播风险。

3.3 Far UV-C 技术在消毒应用中的潜在问题

现阶段 Far UV-C 技术的应用还存在以下问题:

1) 现有 Kr-Cl 准分子灯的滤光片技术所能达到的过滤截止波长多为 230 nm 以上,未来还需研究能完全过滤有害波长的技术。

2) 目前一些国家协会和国际组织如 ACGIH (美国政府工业卫生专家协会) 和 ICNIRP (国际非电离辐射保护委员会) 给出了 Far UV-C 每日最大暴露时间阈值(暴露时间为 8 h),但未明确暴露时间超过 8 h 的状况。同时也有研究表明,在远超安全剂量辐射值的 Far UV-C 下人体皮肤亦无伤害,该安全阈值是否可以适当提高还需进一步研究。

3) 对于 Far UV-C 灯产生的 O_3 的检测还未建立统一的标准方法,这主要与测试方法和测试环境的差异有关,同时也需大量实践应用的积累,但相关标准的缺失或对推动 Far UV-C 灯的具体应用形成阻碍。

4 结语

相对于传统消毒技术, Far UV-C 技术在目前的

研究结果上具有可实现空间免疫、人机共存的消毒特点,适合作为消毒灯、消杀通道及消杀过滤器等部署于公共交通运输工具及公共交通场所,对于公共交通系统常态化疫情防控具有重要意义和应用潜力。但 Far UV-C 技术的具体实现仍存在一些潜在问题未解决,需进一步深入研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 山东省城市公共交通协会. 山东省出台《城市公共交通重大呼吸道传染病疫情防控规范》[J]. 人民公交, 2020(3): 13. Shandong Urban Public Transport Association. Shandong Province issued the 'code for prevention and control of major respiratory infectious diseases in urban public transport'[J]. People's Public Transportation, 2020(3): 13.
- [3] 李健, 陈田, 张懿木. 面向传染病疫情防控的公共交通运行管理决策支持研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 30. LI Jian, CHEN Tian, ZHANG Yimu. Research on decision support for public transport operations and management for epidemic prevention and control of infectious diseases[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 30.
- [4] 吴楠, 李远东, 赵安琪, 等. COVID-19 疫情后武汉市公共交通运营策略研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(3): 64. WU Nan, LI Yuandong, ZHAO Anqi, et al. Operation strategy for public transportation in Wuhan after the COVID-19 epidemic[J]. Journal of Transportation Engineering and Information,

- 2020, 18(3): 64.
- [5] BALCAN D, GONÇALVES B, HU H, et al. Modeling the spatial spread of infectious diseases; the global epidemic and mobility computational model[J]. *Journal of Computational Science*, 2010, 1(3): 132.
 - [6] 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: 2752.
 - [7] 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.
 - [8] KITAGAWA H, NOMURA T, NAZMUL T, et al. Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination[J]. *American Journal of Infection Control*, 2021, 49(3): 299.
 - [9] KITAGAWA H, NOMURA T, NAZMUL T, et al. Effect of intermittent irradiation and fluence-response of 222 nm ultraviolet light on SARS-CoV-2 contamination[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 2021, 33: 102184.
 - [10] 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.
 - [11] BUONANNO M, RANDERS-PEHRSON G, BIGELOW A W, et al. 207-nm UV light - a promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. I: in vitro studies[J]. *PLoS (Public Library of Science) One*, 2013, 8(10): e76968.
 - [12] DOUGHTY M J, ZAMAN M L. Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures; a review and meta-analysis approach [J]. *Survey of Ophthalmology*, 2000, 44(5): 367.
 - [13] The International Ultraviolet Association (IUVA). Far UV-C radiation; current state-of knowledge [EB/OL]. (2021-05-11) [2022-07-14]. <https://iuva.org/UV-C-Radiation-White-Paper>.
 - [14] KOLOZSVÁRI L, NÓGRÁDI A, HOPP B, et al. UV absorbance of the human cornea in the 240-to 400-nm range[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2002, 43(7): 2165.
 - [15] WOODS J A, EVANS A, DONALD FORBES P, et al. The effect of 222-nm UVC phototesting on healthy volunteer skin; a pilot study[J]. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 2015, 31(3): 159.
 - [16] BUONANNO M, STANISLAUSKAS M, PONNAIYA B, et al. 207-nm UV light-a promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. II: In-vivo safety studies[J]. *PLoS (Public Library of Science) One*, 2016, 11(6): e0138418.
 - [17] 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): 483.
 - [18] NARITA K, ASANO K, MORIMOTO Y, et al. Disinfection and healing effects of 222-nm UVC light on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infection in mouse wounds[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, 178: 10.
 - [19] 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 (Public Library of Science) One*, 2018, 13(7): e0201259.
 - [20] FUKUI T, NIIKURA T, ODA T, et al. Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans[J]. *PLoS (Public Library of Science) One*, 2020, 15(8): e0235948.
 - [21] 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.
 - [22] BUONANNO M, WELCH D, BRENNER D J. Exposure of human skin models to KrCl excimer lamps; the impact of optical filtering [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2021, 97(3): 517.
 - [23] 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.
 - [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 紫外线消毒器卫生要求: GB 28235—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
 - [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 紫外线空气消毒器安全与卫生标准: GB 28235—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
 - [26] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Hygienic requirements for ultraviolet appliance of disinfection: GB 28235—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
 - [27] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2021 TLVs and BEIs; based on the documentation of the threshold limit values for chemical and physical agents & biological exposure indices[M]. Cincinnati: ACGIH, 2021:154.
 - [28] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)[J]. *Health Physics*, 2004, 87(2): 171.
 - [29] 国家市场监督管理总局. 紫外线杀菌灯: GB 19258—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
 - [30] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Ultraviolet germicidal lamp: GB 19258—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

(收稿日期:2022-08-16)