

**杀菌 UV-C**  
**光源、产品和应用**  
**(中文版)**

**2020 年 9 月**

**全球照明协会发布**

**中国照明电器协会组织编译**

## 前言

### 关于全球照明协会（Global Lighting Association, GLA）

全球照明协会（GLA）是全球照明行业的代言人。GLA 分享与照明行业相关的政治、科学、商业、社会和环境问题的信息，并向国际领域的利益相关方倡导全球照明行业的立场。

参见 [www.globallightingassociation.org](http://www.globallightingassociation.org)

### 关于本文件

本文件是全球照明协会关于 UV-C 杀菌辐照系列出版物中的第二份文件。

第一份文件是《关于杀菌 UV-C 的立场声明：UV-C 安全性指南》。该文件于 2020 年 5 月发布，是针对现有 UV-C 设备的技术安全标准缺失所做出的回应。该文件属于临时措施，其有效期截止至国际电工委员会（IEC）和保险商实验室（UL）等标准制定组织发布相关的安全性标准。

第二份文件考虑了 UV-C 辐照的消毒特性，简要概述了 UV-C 安全性指南中提到的安全问题，并讨论了 UV-C 消毒光源、产品和应用，最终得出以下结论：通过采取适当的安全措施，可以确保 UV-C 在有效灭活致病微生物和病毒的同时具备良好的安全性。在此方面值得注意的是，初步研究结果已经证实 UV-C 还可以有效地杀灭 SARS-CoV-2 病毒。

本文件将根据最新信息及时进行更新，并可在全球照明协会官网的“图书馆”中进行阅读下载。

参见 [www.globallightingassociation.org](http://www.globallightingassociation.org)

# 目 录

前言.....	2
1. UV-C 是什么? .....	4
2. UV-C 的消毒特性和新冠疾病 (COVID-19) .....	4
2.1 杀菌 UV-C 照射 (也称为 UV-C 消毒照明).....	4
2.2 UV-C 的消毒特性和新冠疾病 (COVID-19) .....	5
2.3 UV-A 和其他消毒光源 .....	5
3. UV-C 的潜在危害及安全性措施 .....	5
4. UV-C 消毒光源 .....	6
4.1 低压汞灯 .....	6
4.2 中高压汞灯 .....	6
4.3 脉冲氙灯 .....	7
4.4 紫外准分子灯 .....	7
4.5 UV-LED .....	7
5. UV-C 产品与应用.....	7
5.1 空气消毒.....	7
5.1.1 开放式装置.....	8
5.1.2 半开放式装置.....	8
5.1.3 封闭式装置.....	8
5.2 水体消毒 .....	9
5.3 表面消毒 .....	9
6. 总结与结论 .....	9
7. 参考文献.....	10
附录 A .....	15
各类型紫外光源的主要性能	
附录 B .....	16
部分国家和地区的 UV-C 装置标准和法规	

## 1. UV-C 是什么？

紫外辐射是波长介于 X-射线和人眼可见光之间的电磁辐射。由于紫光是人眼可见光谱中频率最高的光，因此紫光也是可见光范围内波长最短的光。术语“紫外 (ultraviolet)”的含义就是“超出紫光 (beyond violet)”，其中“ultra”源自拉丁语，表示“超出，以外 (beyond)”的意思。太阳辐射光中约有 10% 是紫外辐射；也可以利用人造光源来产生紫外辐射。

UV-C 通常指波长介于 100-280 nm 之间的辐射。波长低于 200 nm 的 UV-C 通常称为真空紫外，会被环境中的氧气和臭氧强烈吸收。而产生 200 nm 以上 UV-C 辐射的灯和/或系统则可以用于表面消毒、空气消毒和水体消毒。

## 2. UV-C 的消毒特性和新冠疾病 (COVID-19)

### 2.1 UV-C 杀菌辐照 (也称作 UV-C 消毒照明)

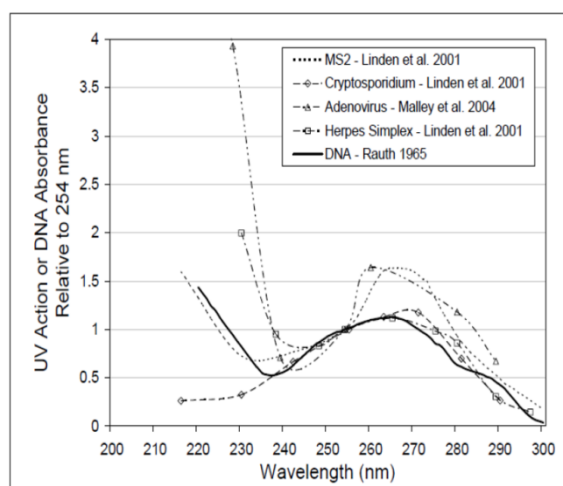
UV-C 处理方法是一种成熟的消毒技术。自 1910 年发现 UV-C 具有杀灭细菌、霉菌和酵母等微生物甚至病毒的功能，该技术得到了广泛的应用。

UV-C 辐射的杀菌消毒效力取决于：

- 微生物和/或病毒的作用光谱
- UV-C 辐射的波长 (常用单位: nm)
- UV-C 剂量或通量, 即单位面积内的 UV-C 能量 (常用单位:  $J/m^2$  或  $mJ/cm^2$ ), 是以下两个参数的乘积:
  - UV-C 辐照度, 即单位面积内的 UV-C 功率 (常用单位:  $W/m^2$  或  $\mu W/cm^2$ )
  - 微生物或病毒的曝辐时间 (常用单位: s)
- 应用特性, 例如:
  - UV-C 光源到作用表面的距离 (针对表面消毒的情况)
  - 材料的表面特性 (针对表面消毒的情况)
  - 空气流通情况 (针对空气消毒的情况)
  - UV-C 光源的入射光束角
  - 环境温度和湿度
  - 天花板、墙壁和家具等物体的反射

通常采用杀菌作用光谱的图示法来描述不同波长辐射的杀菌效力。CIE 155 [2]对杀菌作用光谱做了规定, 是通过对 235 nm-313 nm 范围内的杀菌效果试验数据进行插值得到的。目前杀菌消毒行业普遍采用 CIE 155 规定的杀菌作用光谱。然而随着 UV-C-LED 和准分子灯等新型光源的开发, 这些光源能够辐射出波长低于 235 nm 的光谱, 因此杀菌作用光谱也有必要进行相应的研究。

图 1 给出了作用光谱的示例。



Source: Adapted from Rauth (1965), Linden et al. (2001), and Malley et al. (2004)

图 1.多种微生物和病毒的作用光谱，图例中从上至下分别表示大肠杆菌噬菌体（MS2）、隐孢子虫（Cryptosporidium）、腺病毒(Adenovirus)、单纯疱疹（Herpes Simplex）以及 DNA。

（来源：Rauth（1965），Linden et al（2001），Malley et al（2004））

## 2.2 UV-C 的消毒特性与新冠肺炎（COVID-19）

新冠肺炎（COVID-19）感染是由名为 SARS-CoV-2 的新型冠状病毒引起的。冠状病毒（CoVs）由四组包裹在双层脂质膜中的折叠单链 RNA 病毒组成，表面布满了形状类似皇冠上突出尖刺的突刺蛋白，因此得名冠状病毒。冠状病毒常会导致呼吸道感染，约 20% 的普通感冒是由冠状病毒引起的。其他类型的冠状病毒包括 2002-2004 年爆发的非典病毒 SARS-CoV 和 2012-2013 年爆发的中东呼吸综合征 MERS-CoV 病毒。

SARS-CoV-2 与 SARS-CoV 很相似，因此可以基于对 SARS-CoV 的研究来推断 UV-C 对 SARS-CoV-2 的灭活效力<sup>1</sup>。波士顿大学最近的研究表明<sup>2</sup>，适当的 UV-C 剂量可完全灭活 SARS-CoV-2 病毒。几秒钟内研究人员就不再检测到任何病毒<sup>3</sup>。此外，意大利 Bianco 等人的研究也证实了 UV-C 辐射对灭活和抑制 SARS-CoV-2 病毒的有效性<sup>4</sup>。

## 2.3 UV-A 和其他消毒光源

COVID-19 流行病对健康的影响可能包括了细菌感染、真菌感染，以及其他由于感染者的免疫系统衰弱或与新冠患者的近距离接触所引发的感染。依据人员流动和空间需求情况，可以采用的消毒方式包括无人时进行不定期的 UV-C 消毒、在有人情况下进行持续的 UV-A 消毒[3, 4]或 405 nm 可见光消毒[5, 6]、局部化学消毒，也可以综合使用以上几种消毒方式。对于上述的每种方式，都必须注意鉴别获得临床证明的有效方法和名称相似的无效产品，例如黑光灯、捕虫灯以及未经证明的化学品是不可取的。注意：每一种辐照方案的有效性、安全性和运行影

<sup>1</sup> 美国疾病控制和预防中心确认 0.5-1.8  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  的辐射剂量对所有被测病毒的灭活率都可以达到 99.9%，包括甲型流感（H1N1）、禽流感病毒（H5N1）、低致病性甲型流感病毒（H7N9）、MERS-CoV、SARS-CoV 和许多其他病毒。

<sup>2</sup> Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation, Research Square

<sup>3</sup> 试验数据证实，22  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  剂量可在 25 s 内达到 99.9999% 的灭活率。

<sup>4</sup> 3.7  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  的 UV-C 剂量足以达到 99.9% 的灭活率，16.9  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  剂量时可以完全杀灭所有病毒。

响都必须由专业人员来确认和处理。

### 3. UV-C 潜在危害和安全性措施

UV-C 装置会产生 100 nm 到 280 nm 波长范围内的单波长或宽光谱 UV-C 辐射。为了有效消毒，这些 UV-C 装置产生的 UV-C 辐射能量比普通太阳光中的 UV-C 能量高得多。而如此高的 UV-C 辐射能量会对被照的人体、动物或材料产生危害。但是采取适当的安全防护措施可以缓和这些影响。

UV-C 产生的危害包括两个方面——辐射和臭氧 (O<sub>3</sub>)

- 辐射会损伤人眼，并导致皮肤严重灼伤。辐射也会损伤材料。
- 波长低于 240 nm 的 UV-C 会产生臭氧危害，从而导致人体中毒。

安全防护措施取决于 UV-C 光源类型和应用要求。主要包括以下几点：

- 屏蔽防护，避免 UV-C 直接照射到人体、动物或敏感材料
- 光源完全封闭在设备腔体或灯具里
- 设置控制器或辐射感应装置，以防止在有人情况下开启光源
- 联锁装置，以防止在封闭灯具打开时开启光源
- 计时器或其他控制装置，确保每 8 小时周期内的设备工作时间符合最大辐射指南要求
- 个人防护装备如护目镜、手套、面罩、防护服、辐射剂量计
- 警告标志、安装指南、操作手册以及安全培训

与其他所有的人机交互应用一样，UV-C 消毒的光源、产品以及应用环境都必须确保安全性。更多信息详见 GLA 发布的《关于杀菌 UV-C 照射的立场声明：UV-C 安全性指南准则》。

### 4. UV-C 杀菌光源

光源是 UV-C 消毒装置的核心，决定了微生物灭活的机理和有效性。UV-C 光源包括汞灯、脉冲氙灯、准分子灯、UV-C LED 和 UV-C 激光器。下文对常用的 UV-C 光源进行了介绍，并在附录 A 中进行了总结。

#### 4.1. 低压汞灯

低压汞灯 (LPM) 具有效率高、成本低、技术成熟等优点，因此被广泛用作消毒和灭菌的光源。低压汞灯内填充稀有气体和汞，常见的充气压为 2-5 Torr (即 250-700 Pa) 的氙气和几个 mTorr (约 0.5-5 Pa) 的汞蒸气。在室温下，所有可产生 UV-C 辐射的元素中汞蒸气压最高。低压汞灯的特征光谱包含了两条汞的紫外共振谱线。其中普通功率的低压汞灯的 254 nm 辐射效率可达到 50% 以上，而超过 300 W 的大功率灯的 254 nm 辐射约为 30%。低压汞灯的另一条强共振谱线在 185 nm，其辐射效率大概是 254 nm 的五分之一。185 nm 辐射也可以用于消毒杀菌，但由于光子能量高，会产生臭氧。因此市场上有两种类型的 UV-C 低压汞灯：254 nm 紫外灯和同时辐射两种谱线的 185 nm 紫外灯。低压汞灯杀菌灯的外形轮廓和结构同一般照明中常用的荧光灯相似。

#### 4.2. 中高压汞灯

中压和高压汞灯发出的光谱是一个连续谱叠加许多汞和氙的原子谱线，通常

被用作光化学反应的光源。中高压汞灯中汞的 185 nm 和 254 nm 共振谱线几乎全部被吸收，因此放电产生的是更高能级之间的辐射激发跃迁，引起 313 nm、365 nm、405 nm、436 nm、546 nm 和 578 nm 等强谱线发射。由于在 0.2-2 m 电极间隙上施加了 0.5-20 kW 的高功率密度，因此中高压汞灯产生的 250-280 nm UV-C 辐射强度足够起到杀菌作用。但是，中高压汞灯放电过程中产生巨大热量，因此必须配备额外的冷却系统，这会增加设备的成本和安全风险。因此，中高压汞灯主要用在大型的流动水体杀菌系统中。

#### 4.3. 脉冲氙灯

脉冲氙灯通常也叫做脉冲强光 (IPL)，是高强度气体放电光源，其瞬时功率可以超过 50 kW，产生高强度单脉冲。氙灯发射的全光谱覆盖紫外辐射到近红外辐射，其连续谱强度很高，并在 275 nm 附近具有很强的原子特征谱线，因此可以用于杀菌。IPL 在空气消毒、表面消毒和食品消毒方面的有效性已经得到了证实[7-10]。目前普遍认为，脉冲氙灯对微生物灭活的机理是光热效应和紫外光化学效应的共同作用。脉冲氙灯杀菌消毒的优点是快速高效、无化学残留、无异味。然而和中高压汞灯一样，高能耗问题和散热问题限制了 IPL 的应用。

#### 4.4. 准分子灯

准分子灯能够产生窄带光谱的紫外和真空紫外辐射。近期 222 nm KrCl 准分子灯获得了极大的关注，原因是多个研究报告表明 KrCl 准分子灯产生的深紫外辐射可以有效地灭活微生物和病毒却不会对被辐照哺乳动物的皮肤和眼睛产生伤害[11-14]。这表明准分子灯有望安装在开放式的灯具设备中，用于空气消毒和表面消毒。

通过加滤光片的方式，单波长的 222 nm 辐射可以用于有人的环境下，只要其参数设计合理并符合公开的安全性指南即可。已发表的研究结果中所采用的曝辐水平已远高于现有的安全性指南[15-17]。更多研究工作正在进展中，以便进一步评估 222 nm 辐射对人体的生理影响。

研究已经证实了 KrCl 准分子灯的 222 nm 辐射可以杀灭季节性的冠状病毒。目前正在研究该波长紫外辐射对 SARS-CoV-2 的灭活作用。准分子灯的设计要考虑臭氧问题。

#### 4.5. UV-LED

作为固态光源，UV-LED 在各种紫外特种应用中表现出了巨大的潜力，是近几年的研究焦点。最近 365 nm 以上的 UV-A LED 技术获得了重大突破，产品已实现了量产。但是由于 UV-A 辐射的杀菌能力有限，因此大部分杀菌消毒应用中通常采用 UV-A/TiO<sub>2</sub> 光催化方法[15-18]，而不是单独使用 UV-A 杀菌[19-21]。深紫外(DUV) LED 包括波长 280-315 nm 的 UV-B LED 和波长<280 nm 的 UV-C LED，对于微生物的灭活效率很高[22-31]，但是由于其本身的辐射效率低、功率小、成本极高，因此实际应用很少。然而鉴于其结构尺寸的灵活性以及辐射波长的可选择性和组合性[32-40]，DUV-LED 在杀菌消毒领域被寄予厚望。另外基于 UV-LED 的高级氧化技术 (AOT) 已成为杀菌消毒应用研究的趋势之一[41-44]。一旦技术瓶颈取得突破，可以预计到 DUV LED 将会在杀菌应用方面获得大幅度的增长。

## 5. UV-C 产品和应用

UV-A、UV-B 和 UV-C 的辐射都可以造成细菌、细菌孢子、霉菌和酵母菌等微生物的失活。此外，UV-C 辐射还可以杀灭病毒。而每种类型的微生物或病毒都对应特定的失活剂量。

UV-C 产品已应用于工业、商业、医疗、公共和居家环境中的空气消毒、水体消毒和表面消毒。了解 UV-C 应用要求和应用环境，才能够采取恰当的安全防范措施并做好人员培训，以便正确操作和维护 UV-C 设备。（参见《关于杀菌 UV-C 照射的立场声明：UV-C 安全性指南》）。

### 5.1 空气消毒

封闭环境或室内循环的空气中包含各种微生物和病毒。这些污染物在整个建筑内传播，会引发感染并致病。

通过使用开放式、半开放式或封闭式的 UV-C 杀菌装置进行照射，可以大大减少上述污染物及其对应的空气传播所引起的感染。用于空气消毒的产品通常使用在商业环境和公共环境中。

#### 5.1.1 开放式装置

使用开放式 UV-C 装置进行空气消毒是一种简单有效的方法，但必须做好防护措施以免该场所内的人员遭受辐射伤害。因此在商业和公共环境中，绝大部分开放式装置主要应用在人员可控的区域位置，即所谓的控制区。在专业环境中，场所内人员则必须使用个人防护设备（PPE）。

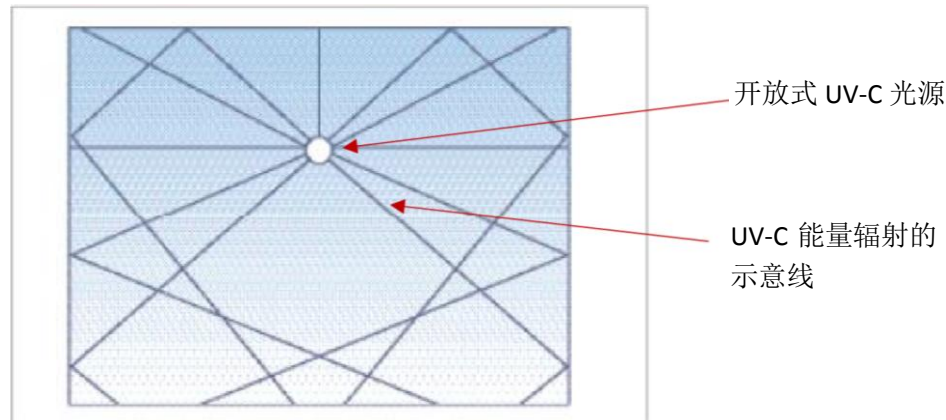


图 2 采用开放式 UV-C 光源的封闭控制区的空间示意图

#### 5.1.2 半开放式装置

半开放式的 UV-C 空气消毒装置将整个环境空间分为两部分，上方空间区域内进行消毒杀菌，而下方空间内的人员则不会接触到有害的紫外辐射。半开放式装置的典型方案之一是上层空气消毒装置，其中的 UV-C 光源出光方向朝向水平面上方。



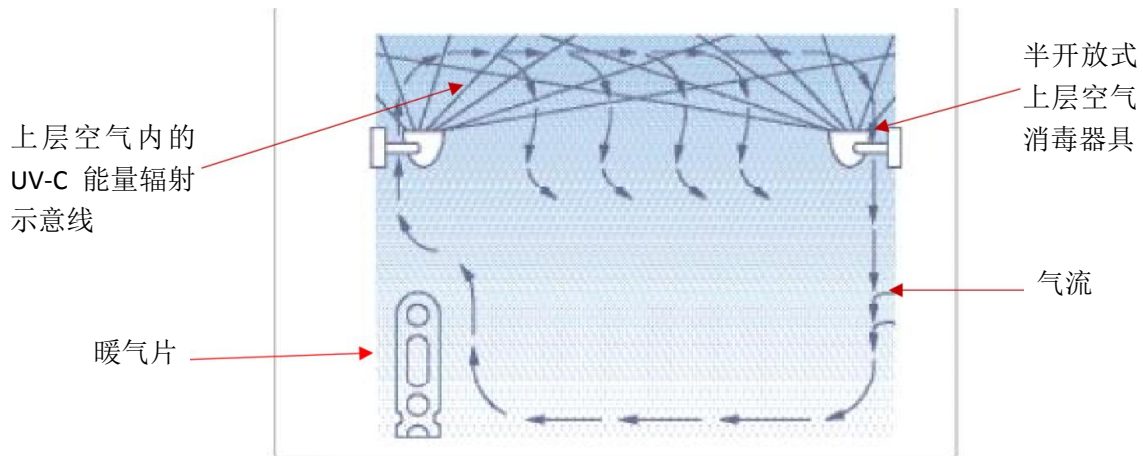


图 3 采用半开放式上层空气消毒装置的空间示意图

### 5.1.3 封闭式装置

全封闭式空气消毒装置的优点是场所内的人员完全接触不到有害的紫外辐射。其典型方案包括内置 UV-C 光源的封闭式消毒橱柜和暖通空调（HVAC）系统。

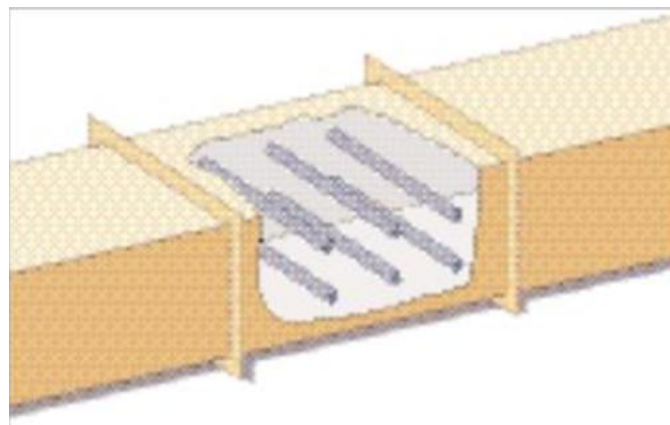


图 4 全封闭式 HVAC 系统中的 UV-C 光源示意图

## 5.2 水体消毒

水体中含有种类繁多的微生物，基本上都能引起各种疾病，特别是免疫系统较弱的婴幼儿和老年人更容易受到感染。采用 UV-C 辐射来进行水体消毒，不需要添加额外的化学药品，因此不会产生有害的副产物，也不会影响水质口感。此外 UV-C 消毒装置安装简单、维护费用低、占用空间小，也是其主要的优点。

UV-C 水体消毒系统通常都采用封闭装置，紫外灯外装有能够透射 UV-C 的石英套管或聚四氟乙烯（PFTE）套管，避免紫外灯与水直接接触。

典型的水体消毒应用包括：

- 饮用水（包括冷水机、饮水机、咖啡机）
- 工业用水
- 游泳池
- 鱼池和水族馆
- 废水

水质会严重影响UV-C系统的消毒性能。常见的影响因素包括铁含量、硬度、悬浮物总浓度和紫外透过率。水中的各种有机物和无机物都会吸收UV-C，从而影响消毒效果。

UV-C水体消毒主要应用于工业、公共和居家环境领域。

### 5.3 表面消毒

与空气消毒应用相同，UV-C表面消毒可以采用开放式、半开放式或封闭式装置。

UV-C表面消毒只适合用于对光滑表面直接进行UV-C照射。粗糙表面上的凹痕只能接收到间接辐照，则其中的微生物和病毒不易被灭活。

实际应用中，固体表面、颗粒材料和包装材料（无论是塑料、玻璃、金属、纸板、箔材等）都是通过高强度的直接辐照来杀菌或抑菌的。

而粗糙表面可以采用生成臭氧的短波UV-C来进行处理，能够获得更好的消毒效果。因为有毒的臭氧可以穿透材料的凹痕和组织结构，并使微生物和病毒失活。不过臭氧具有毒性，只能在封闭的橱柜/腔体中使用。

表面消毒主要用于工业和公共领域。封闭式橱柜和腔体也可用于家居环境的表面消毒，因为其设计带有安全联锁装置，可以防止UV-C暴露。

## 6. 总结

新冠疫情（COVID-19）爆发以来，亟需有效的空气消毒、水体消毒和表面消毒器具来控制SARS-CoV-2病毒的传播。而针对该病毒开发的消毒设备也可以用来灭杀病毒和其他微生物。

UV-C产品能够发射适用于消毒杀菌所需的光谱，因此可以成为对抗有害微生物和病毒、保护人类健康的有力武器。适当的UV-C辐照度和充足的曝辐时间，能够产生足够的辐射剂量来有效灭活病毒和微生物。针对每种应用情况都必须进行特定分析，以确保各类UV-C产品的有效性。此外，UV-C产品也可以与其他消毒手段例如UV-A、UV-B、化学药品等结合使用，以达到更高的消毒水平。

使用UV-C产品时必须高度重视安全性。GLA已发布了《UV-C安全性指南》文件来解决UV-C产品的安全性问题。该文件为安全性的标准制定指明了方向，并推动了UV-C产品在全球范围内的安全使用。

附录B列举了部分国家和地区已实行的UV-C设备管理标准及相关法规。该列表并不详尽，其目的在于本文件发布时提供更多已知的相关信息。GLA鼓励读者去进一步研究目标国家或地区的相关标准和规定。

鉴于UV-C本身的特性，通常应由经过培训的专业人员来指定有效的UV-C产品，并进行安装和操作。如果没有仔细考虑并充分了解其安全问题，GLA不建议消费者自行使用。

需要注意的是，监管机构对声称可治愈或消除SARS-CoV-2病毒的产品非常重视。国家卫生监管机构已采取行动，禁止个人或企业对未获得官方批准的器械或治疗方法进行上述宣传。

另外有必要提醒消费者，由于新冠疫情（COVID-19）爆发造成公众对消杀产品产生迫切需求，目前市场上已出现许多UV-C产品向公众销售。其中许多产品可能未提供足够的安全防护措施来避免紫外直接暴露，从而存在使用不当的情

况，家居环境中尤其需要注意。消费者在购买和使用 UV-C 产品时，销售方应该提供必要的安全标准、法规、指南和预防措施告知。

总而言之，通过采取适当的安全措施，UV-C 产品可以安全灭活恶性的微生物和病毒。如本文件前言所述，初步研究结果表明 UV-C 还可以灭杀 SARS-CoV-2 病毒。

GLA 的出版物将根据最新信息进行更新，并可在全球照明协会网站的“图书馆”中进行阅读下载。参见 [www.globallightingassociation.org](http://www.globallightingassociation.org)

## 7 参考文献

- [1] *GLA Position Statement on Germicidal UV-C Irradiation – UV-C SAFETY GUIDELINES*,  
[https://www.globallightingassociation.org/images/files/publications/Media\\_Release\\_-\\_Global\\_Lighting\\_Association\\_Releases\\_Safety\\_Guidelines\\_for\\_UV-C\\_Devices.pdf](https://www.globallightingassociation.org/images/files/publications/Media_Release_-_Global_Lighting_Association_Releases_Safety_Guidelines_for_UV-C_Devices.pdf)
- [2] CIE 155 (2003) Ultraviolet air disinfection
- [3] Decontamination and Reuse of Filtering Facepiece Respirators,  
<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/ppe-strategy/decontamination-reuse-respirators.html>
- [4] Livingston SH, Cadnum JL, Benner KJ, Donskey CJ (2020) Efficacy of an ultraviolet-A lighting system for continuous decontamination of health care-associated pathogens on surfaces. *Am. J. Infect. Control* 48: 337-339.  
[https://www.ajicjournal.org/article/S0196-6553\(19\)30746-1/pdf](https://www.ajicjournal.org/article/S0196-6553(19)30746-1/pdf)
- [5] ‘Irradiation with UV light kills SARS-CoV-2’, *NEWS Medical*, June 8 2020  
<https://www.news-medical.net/news/20200608/Irradiation-with-UV-light-kills-SARS-CoV-2.aspx>
- [6] Rutala R, Kanamori J, Gergen MF, Sickbert-Bennet EE, Sexton DJ, Anderson DJ, Laux J, Weber DJ (2018) Antimicrobial activity of a continuous visible light disinfection system. *Infect. Control & Hosp. Epidemiol.* 39: 1250-1253.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30160225>
- [7] Murrell LJ, Hamilton EK, Johnson HB, Spenser M (2019) Influence of a visible-light continuous environmental disinfection system on microbial contamination and surgical site infections in an orthopedic operating room. *Am. J. Infect. Control* 47: 804-810.  
[https://www.ajicjournal.org/article/S0196-6553\(18\)31146-5/pdf](https://www.ajicjournal.org/article/S0196-6553(18)31146-5/pdf)
- [8] Wekhof A. Disinfection with flash lamps [J]. *PDA J Pharmaceut Sci Technol*, 2000, 4 (3): 264–267.
- [9] Takeshita K, Yamanaka H, Sameshima T, et al. Sterilization effect of pulsed light on various microorganisms [J]. *Journal of Antibacterial & Antifungal Agents Japan*, 2002, 30.
- [10] Wang T, MacGregor SJ, Anderson JG., et al. Pulsed ultra-violet inactivation spectrum of *Escherichia coli* [J]. *Water Research*, 2005, 39 (13): 2921–2925.
- [11] Bhavya M L, Umesh Hebbar H. Pulsed light processing of foods for microbial safety [J]. *Food Quality and Safety*, 2017, 1 (3): 187–201.
- [12] 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, pp 1–7.

- [13] 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. (open access)
- [14] Ushio. White Paper: Care 222@ in the workplace: Testing effectiveness of long-range surface infection prevention.
- [15] IES Committee Report: Germicidal Ultraviolet (GUV) – Frequently Asked Questions. IES CR-2-20-V1, 2020-04-15.
- [16] Sachiko Kaidzu, Kazunobu Sugihara, Masahiro Sasaki, Aiko Nishiaki, Tatsushi Igarashi & Masaki Tanito (2019) Evaluation of acute corneal damage induced by 222-nm and 254-nm ultraviolet light in Sprague–Dawley rats, *Free Radical Research*, 53:6, 611-617, DOI:10.1080/10715762.2019.1603378
- [17] Narita K, Asano K, Morimoto Y, Igarashi T, Nakane A (2018) Chronic irradiation with 222-nm UVC light induces neither DNA damage nor epidermal lesions in mouse skin, even at high doses. *PLoS ONE* 13(7): e0201259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201259>
- [18] Manuela Buonanno, David Welch, Igor Shuryak & David J. Brenner Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses, *Scientific Reports*, 2020, 10:10285 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67211-2>
- [19] Xiong P, Hu J. Inactivation/reactivation of antibiotic-resistant bacteria by a novel UVA/LED/TiO<sub>2</sub> system [J]. *Water Research*, 2013, 47 (13): 4547–4555.
- [20] Bianculllo F, Moreira N F F, Ribeiro A R. Heterogeneous photocatalysis using UVA-LEDs for the removal of antibiotics and antibiotic resistant bacteria from urban wastewater treatment plant effluents [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 367: 304–313.
- [21] Huang G, Ng Tsz-Wai, Chen H, et al. Formation of assimilable organic carbon (AOC) during drinking water disinfection: A microbiological prospect of disinfection by-products [J]. *Environment International*, 2020, 135. (open access) 14
- [22] Ramesh T, Yaparathne S, Tripp C P, et al. Ultraviolet Light-Assisted Photocatalytic Disinfection of *Escherichia coli* and Its Effects on the Quality Attributes of White Grape Juice [J]. *Food Bioprocess Technology*, 2018, 11: 2242–2252.
- [23] Mori M, Hamamoto A, Takahashi A, et al. Development of a new water sterilization device with a 365 nm UV-LED [J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2007, 45 (12): 1237–41.
- [24] Ragolta C. Pilot study for UVA-LED disinfection of *Escherichia coli* in water for space and earth applications. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20100031695>
- [25] Tsunedomi A, Miyawaki K, Masamura A, et al. UVA - LED device to disinfect hydroponic nutrient solution [J]. *The Journal of Medical Investigation*, 2018, 65 (3–4): 171–176.
- [26] Chatterley C, Linden KG. Demonstration and evaluation of germicidal UV-LEDs for point-of-use water disinfection [J]. *Journal of Water and Health*, 2010, 8 (3): 479–486.
- [27] Lui G Y, Roser D, Corkish R, et al. Point-of-use water disinfection using ultraviolet and visible light-emitting-diodes [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 626–635.
- [28] Vilhunen S M S. Recent developments in photochemical and chemical AOPs in water treatment: a mini-review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*,

- 2010, 9: 323–330.
- [29] Wurtele M A, Kolbe T, Lipisz M, et al. Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes UV LEDs for water disinfection [J]. *Water Research*, 2011, 45: 1481–1489.
- [30] Sholtes K A, Lowe K, Walters G W, et al. Comparison of ultraviolet light-emitting diodes and low-pressure mercury-arc lamps for disinfection of water [J]. *Environmental Technology*, 2016, 37 (17): 2183–2188.
- [31] Rattanakul S, Oguma K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila*, and surrogate microorganisms [J]. *Water Research*, 2018, 130: 31–37.
- [32] Kim D K, Kim S J, Kang D H. Inactivation modeling of human enteric virus surrogates, MS2, Q $\beta$ , and  $\Phi$ X174, in water using UVC-LEDs, a novel disinfecting system [J]. *Food Research International*, 2017, 91: 115–123.
- [33] Nunayon S S, Zhang H H, Lai A C K. Comparison of disinfection performance of UVC-LED and conventional upper-room UVGI systems [J]. *Indoor Air*, 2020, 30: 180–191.
- [34] Mathebula T, Leuschner F W, Chowdhury S P. The Use of UVC-LEDs for the Disinfection of *Mycobacterium Tuberculosis* [C]// 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Cape Town, 2018, pp. 739–744.
- [35] Ali S, Yui S, Muzslay M, et al. Comparison of two whole-room ultraviolet irradiation systems for enhanced disinfection of contaminated hospital patient rooms [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2017, 97 (2): 180–184.
- [36] Green A, Popović V, Pierscianowski J, et al. Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria* and *Salmonella* by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 47: 353–361. 15
- [37] Sholtes K, Linden K G. Pulsed and continuous light UV LED: microbial inactivation, electrical, and time efficiency [J]. *Water Research*, 2019, 165: 114965.
- [38] Woo H, Beck S E, Boczek LA, et al. Efficacy of Inactivation of Human Enteroviruses by Dual-Wavelength Germicidal Ultraviolet (UV-C) Light Emitting Diodes (LEDs) [J]. *Water*, 2019, 11: 1131, pp1–8.
- [39] Song K, Taghipour F, Mohseni M. Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1103–1110.
- [40] Hull N M, Linden K G. Synergy of MS2 disinfection by sequential exposure to tailored UV wavelengths [J]. *Water Research*, 2018, 143: 292–300.
- [41] Rattanakul S, Oguma K. Analysis of hydroxyl radicals and inactivation mechanisms of bacteriophage MS2 in response to a simultaneous application of UV and chlorine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 51 (1): 455–462.
- [42] Sun P, Tyree C, Huang CH. Inactivation of *Escherichia coli*, bacteriophage MS2, and *Bacillus* spores under UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/Peroxydisulfate advanced disinfection conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (8): 4448–4458.
- [43] Chuang Y H, Chen S, Chinn C J, et al. Comparing the UV/monochloramine and UV/free chlorine advanced oxidation processes (AOPs) to the UV/hydrogen peroxide AOP under scenarios relevant to potable reuse [J]. *Environmental Science &*

Technology, 2017, 51 (23): 13859–13868.

- [44] Li G Q, Huo Z Y, Wu Q Y, et al. Synergistic effect of combined UV-LED and chlorine treatment on *Bacillus subtilis* spore inactivation [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1233–1240.

## 附录A

### 各类型紫外光源的主要性能

紫外光源 类型	光谱特性	辐射效率			灯具效率	电源效率	灯具能效			灯功率 (W)
		UV-C	UV-B	UV-A			UV-C	UV-B	UV-A	
低压汞灯	线光谱, 254 nm 为主	55.3%	2.8%	1.9%	0.6	0.8	29.9%	1.5%	1.0%	4-800
中高压汞灯	连续光谱叠加线 谱, 主峰 365 nm	3.4%	3.2%	5.2%	0.6	0.7	1.7%	1.6%	2.7%	500-20000
脉冲氙灯	连续光谱	0.5%	0.5%	1.5%	0.6	0.7	0.2%	0.3%	0.7%	10~50000
KrCl 准分子灯	222 nm 窄带光 谱, 带宽 2~3 nm	4~10%			0.6	0.7	1.6~4%			20~1000
UV-A LED	带光谱, 带宽~10 nm			30~40%	0.9	0.9			24%~32%	1~36 (芯片 级)
DUV LED	带光谱, 带宽~10 nm	<3%	<3%		0.9	0.9	<2.4%	<2.4%		0.1~3 (芯片 级)

## 附录B

### 部分国家和地区的UV-C装置标准和法规

以下列表并不详尽，仅供参考。读者需要自行检索来确定相关标准和机构的完整清单。

#### 澳大利亚

##### 标准

AS/NZS 3100

AS/NZS 60335

AS/NZS 2500

##### 管理机构

Therapeutic Goods Administration

State and Territory electrical safety regulators

#### 巴西

##### 标准

ABNT NBR 60335 Segurança de aparelhos eletrodomésticos e similares

ABNT NBR 16248 Proteção ocular pessoal — Filtros para radiação ultravioleta — Requisitos de transmissão e recomendações de uso

ABNT NBR 16695 Vestuário – fator de Proteção ultravioleta – Requisitos e métodos de ensaio

IEC and CIE standards apply when ABNT standards are not available.

##### 管理机构

Products related to people's health must follow National Health Surveillance Agency rules.

#### 中国

##### 标准

GB/T 32092-2015 紫外线消毒技术术语

GB/T 19258-2012 紫外线杀菌灯

##### 管理机构

国家卫生健康委员会

#### 欧盟

##### 标准

EN 62471:2008 Photobiological safety of lamps and lamp systems

EN 60598-1:2015/A1:2018 Luminaires - Part 1: General requirements and tests (EN 60598 series may be used as the basis for risk assessment considering mechanical, electrical and thermal safety)

EN 14255-1:2005 Measurement and assessment of personal exposures to incoherent optical radiation - Part 1: Ultraviolet radiation emitted by artificial sources in the workplace

EN 14255-4:2006 - Measurement and assessment of personal exposures to incoherent optical radiation - Part 4: Terminology and quantities used in UV-, visible and IR-exposure



measurements

ISO 12609-2 - Eyewear for protection against intense light sources used on humans and animals for cosmetic and medical applications - Part 2: Guidance for use

ISO 15858:2016 UV-C Devices — Safety information — Permissible human exposure  
法规

DIRECTIVE 2006/25/EC

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0025&from=EN>

## 印度

标准

IS 16108 Photobiological Safety of Lamp and Lamp Systems

## 日本

标准

JIS C 7605: 2011 Germicidal lamps

JIS C 9335-2-27: 2020 Household and similar electrical appliance -Safety

Part 2-27: Particular requirements for appliances for skin exposure to optical radiation  
(equivalent to IEC60335-2-27)

JIS Z 8811: 1968 Measuring Methods of Ultra-Violet Rays for Sterilisation

JIS Z 8812: 1987 Measuring Methods of Eye-hazardous Ultraviolet Radiation

管理机构

The National Institute for Environmental Studies conducts research into the health effects of ultraviolet rays.

Some manufacturers of UV-C products observe CDC (Centers for Disease Control and Prevention) and WHO guidelines. 19

## 新西兰

标准

AS/NZS 3100

AS/NZS 60335

AS/NZS 2500

管理机构

UV-C device safety - Ministry of Business Innovation and Employment - Worksafe NZ

UV-C radiation use for non-medical purposes - No regulator or regulation

## 中国台湾

标准

CNS 15592 C4529: Photobiological safety of lamps and lamp systems (equivalent to IEC62471)

CNS 2657 C4063: Low-Voltage Mercury Discharge Tube (for Germ Killing)

管理机构

No regulatory agency for UV germicide irradiation. Some safety guidelines for germicidal lamps for medical use are the responsibility of Taiwan Center for Disease Control.

## 英国

### 标准

BS EN 60598EN 62471:2008 Photobiological safety of lamps and lamp systems

EN 60598-1:2015/A1:2018 Luminaires - Part 1: General requirements and tests

EN 14255-1:2005 Measurement and assessment of personal exposures to incoherent optical radiation - Part 1: Ultraviolet radiation emitted by artificial sources in the workplace

EN 14255-4:2006 - Measurement and assessment of personal exposures to incoherent optical radiation - Part 4: Terminology and quantities used in UV-, visible and IR-exposure measurements

ISO 12609-2 - Eyewear for protection against intense light sources used on humans and animals for

cosmetic and medical applications - Part 2: Guidance for use

### 管理机构

Department for Business, Energy and Industrial Strategy

Office for Product Safety and Standards 20

## 美国

### 标准

IEC 62471:2006 (<https://webstore.iec.ch/publication/7076>)

ICNIRP (<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUV2004.pdf>)

ACGIH

(<https://www.acgih.org/forms/store/ProductFormPublic/ultraviolet-radiation-tlv-r-physical-agents-7th-edition-documentation>)

IES RP-27

21 CFR 1002.20 - Reporting of Accidental Radiation Occurrences

<http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=1002.20>

21 Part 1003 Notification of Defects or Failure to Comply

<http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=1003>

21 Part 1004 Repurchase, Repairs, or Replacement of Electronic Products

<http://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=1004>

### 管理机构

Food and Drug Administration

Environmental Protection Agency