

利用上层空间紫外线杀菌 (UR GUV) 系统进行室内空气灭菌



图 1 自然通风的门诊候诊室内配有吊扇和上层空间紫外线杀菌装置。印度新德里国家结核病和呼吸系统疾病研究所。

什么是上层空间紫外线杀菌系统？

上层空间紫外线杀菌（也称为紫外线杀菌辐照或UVGI）系统将安全利用上层空间紫外线杀菌能量与机械空气混合相结合，以便对大量室内空气进行灭菌。（见图1）。

为什么需要上层空间紫外线杀菌？

上层空间紫外线杀菌是一种可负担、有效和可持续的环境控制手段，可用于减少高传播风险场所内的结核传播。

世界卫生组织是否推荐采用上层空间紫外线杀菌系统？

是的，世界卫生组织最新结核病感染预防和控制指南¹指出：“建议使用上层空间紫外线杀菌（GUV）系统，以减少结核分枝杆菌向卫生工作者、卫生保健机构就诊者或高传播风险场所内的其他人的传播。”（建议5）。

在秘鲁和南非的两个结核病病区进行的关于紫外线杀菌有效性的研究发现，结核传播风险降低了70–80%。^{2,3}

其他一些研究表明，在预防麻疹和其他空气传播病原体的空气传播方面，紫外线杀菌都展示了不同程度的消杀效力。^{4,5}

如何判断上层空间紫外线杀菌系统是否适合本机构？

每个卫生机构都应当组织经过培训的卫生机构感染预防控制工作组开展全面的空气传播感染预防控制（IPC）风险评估。随后，应制定一份可行和可持续的感染预防控制计划，以消除并将风险最小化。在考虑包括上层空间紫外线杀菌系统在内的其他措施之前，必须优先考虑管理控制措施。⁶

上层空间紫外线杀菌系统是否应优先于其他环境感染预防控制措施？

如果当地条件和可持续性资源（设施、经费和技术能力）允许的话，可采用上层空间紫外线杀菌来加强环境感染预防控制措施。资源有限场所通常采用自然通风，作为稀释空气中病原体浓度的唯一措施。然而，随季节更替出现的温（热和冷）湿度变化、雨季，以及污染和不同安全保障措施导致的微环境变化，可能会大幅降低设计不良的建筑内和/或门窗关闭时的自然通风效果。高湿度会降低上层空间紫外线杀菌的有效性，而缺乏适宜的空气混合可能会大大降低上层空间紫外线的杀菌效果

甚至使其完全失效。上层空间紫外线杀菌是一种有效的加强自然通风的辅助空气灭活手段，上层空间紫外线杀菌不能取代通风。仍然需要通风来控制气味并减少二氧化碳的积累。上层空间紫外线杀菌可以对所有通风策略形成补充，包括机械通风、自然通风和混合模式通风。

上层空间紫外线杀菌不能取代通风。

应如何使用上层空间紫外线杀菌系统？

上层空间紫外线杀菌系统可用于结核传播高风险的场所（例如，拥挤的门诊部、结核病病房、普通医疗病房、急诊室、特殊呼吸系统疾病室、X光室、手术室、停尸间、惩戒场所、癌症输液中心等）。是否优先部署上层空间紫外线杀菌取决于机构感染预防控制团队的决定。虽然上层空间紫外线杀菌系统并非一种高科技解决方案，但还是应当与机构工程师和设施维护团队合作，共同选择上层空间紫外线杀菌装置。应确保购置优质的上层空间紫外线杀菌装置，确保充分的室内空气混合，确定上层空间紫外线杀菌装置的专业设计/布局，正确安装，书面记录其性能（上层空间的高紫外线杀菌辐照水平以及有人员占用的房间内的低紫外线杀菌辐照水平），并落实系统维护和运行计划及充足的预算。

ETTI 制定了英文、西班牙文、俄文和中文版本的上层空间紫外线杀菌系统维护指南，网址：<http://www.stoptb.org/wg/ett/resources.asp>。⁵ 一些企业通过签订多年期合同（推荐至少五年）提供上层空间紫外线杀菌系统服务，涵盖专业设计/布局、正确安装、书面记录性能和维护。机构需要给指定的内部工作人员配备至少一台手提式紫外线杀菌辐照计来定期检查设备的性能（输出）和安全性。因此，上层空间紫外线杀菌系统的采购应在工程师和维护团队的指导下进行。



图 2 带有UV-3725探测器的 Gigahertz-Optik X11 辐照计 (德国Puchheim)

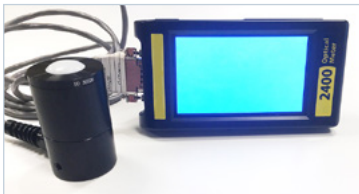


图 3 International Light Technologies公司的2400型辐照计，带有SED240/NS254/TD探测器 (美国马萨诸塞州皮博迪)



图 4 紫外线杀菌辐照计，其传感器安装在视线水平高度上

如何判断上层空间紫外线杀菌是否有效？

若要确定紫外线杀菌灯是否发出正确的波长和设计输出强度，唯一的方法是使用配备有校准到254nm的紫外线杀菌探测器的辐照计。辐照计的读数范围应当为0.01至2000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。紫外线杀菌灯制造商可以提供紫外线杀菌辐照度输出强度和使用寿命等参数（更换时限）。⁵

如何维护上层空间紫外线杀菌系统？

不同上层空间紫外线杀菌装置的紫外线输出强度和分布可能会不尽相同；因此，已安装的上层空间紫外线杀菌装置应当由经过培训的维护工程师或技术人员进行维护，以获得最佳输出。

维护工程师和技术人员应测量上层空间紫外线杀菌装置的总辐照量以及分布情况，并清洁紫外线杀菌灯、反射器和百叶窗（如有）。可以用干漆刷等简单的工具“刷掉”表面上的灰尘。然后用浸有 $\geq 70\%$ 酒精（乙醇或异丙醇）的无绒布清洁表面。清洁且干燥后，开启上层空间紫外线杀菌装置并重新进行测量，以确保所有设备正常工作。此外，还应利用烟雾或其他直观手段检测并确保空气混合（空气从房间内有人员占用的区域流向上层空间）。清洁的频率将取决于微环境，并应根据紫外线杀菌辐照度测量结果进行调整。

有关如何维护上层空间紫外线杀菌装置的详细信息，请参阅ETTI文件《用于结核传播控制的上层空间紫外线杀菌（GUV）空气消毒系统的维护》（Maintenance of upper-room germicidal ultraviolet (GUV) air disinfection systems for TB transmission control），网址：<http://www.stoptb.org/wg/ett/resources.asp>。⁶

上层空间紫外线杀菌系统的配置和运作成本


上层空间紫外线杀菌系统的配置和运作所涉及的成本远不止上层空间紫外线杀菌装置的初始购买价格！这取决于该系统是自带的还是租赁的、是由制造商作为一项服务提供的，还是这些模式的某种组合。配备紫外线杀菌系统的机构必须至少接受安全、性能方面的培训，并且具备一个运作良好且维护得当的辐照计，其中紫外线杀菌探测器校准到 254 nm。这样有助于机构工程师检查系统的运行和安全性。机构需要使用吊扇、壁扇或机械通风来确保空气混合。大多数自然通风的空间内存在某种形式的空气混合；然而，如果不存在空气混合措施，则需要引入这类措施。下表根据可能发生的费用的最佳实践提供相应的估计成本数值。当地的劳动力和电力成本以及进口设备的关税不尽相同。如果制造商提供的报价中将相关服务项目包含在内，则最好由一位紫外线杀菌顾问对建议书进行独立审核。还可以让紫外线杀菌顾问制定投标简报。

表 1

上层空间紫外线杀菌系统的成本

(所有费用均以美元计)

初始成本	估计单位成本	示例			
		单位成本	生命周期成本：1台	生命周期成本：10台	生命周期成本：50台
<p>上层空间紫外线杀菌装置： 这个价格会根据购买数量和税费而有所不同。目前相关方面正在努力通过全球药物基金 (GDF) 确定协商价格，同时列出已预审的装置的清单 (10台及以上可享受10%的折扣；50台及以上可享受20%的折扣)</p>	200 – 2,000 美元	1,000 美元	1,000 美元	9,000 美元	40,000 美元
<p>运输、海关、税款： 价格因国家而异，具体取决于购买数量和当地税费。</p>	单价的 0 – 100%	200 美元 (20%)	200 美元	1,800 美元	8,000 美元
<p>空气混合系统 (风扇等)： 需要空气混合手段。在自然通风的空间中，吊扇或壁扇可以提供这种功能。</p>	20 – 100 美元	30 美元	30 美元	300 美元	1,500 美元
<p>布局设计： 包括现场考察、紫外线杀菌装置的选择和规格、显示紫外线杀菌装置位置和型号的建筑图纸、机械图纸和电气图纸等。</p>	0 – 50 美元	0 美元	0 美元	0 美元	0 美元
<p>安装 (装置、风扇、电气等)： 每个装置位置的电线布线。每个位置的单独电气开关。所需的配电板和断路器。必要时增加机构的供电容量。在每个指定位置安装紫外线装置和电气接线。</p>	单价的 10 – 40%	200 美元 (20%)	200 美元	1,800 美元	8,000 美元
<p>验收测试 (上层空间紫外线杀菌性能)： 评估安装的每台紫外线杀菌装置的功能、位置和方向。开展紫外线辐照评估，以确保每台装置的安全性和有效性 (即房间内人员上方的辐照区存在足够的紫外线杀菌辐照，以及装置附近的人员区域仅存在安全水平的紫外线)。根据需要调整紫外线输出强度。撰写和书面存档验收报告。</p>	单价的 5 – 10%	75 美元 (7.5%)	75 美元	675 美元	3,000 美元
<p>紫外线杀菌辐照计： 若要操作和维护一个紫外线杀菌系统，需要至少一台带有 254 nm 探测器的紫外线辐照计。如果一个机构有超过100台紫外线杀菌装置，可能需要额外的一台辐照计作为备用。(对于生命周期成本，成本需要除以购买的装置总数。)</p>	1,500 – 2,500 美元	2,000 美元	2,000 美元	2,000 美元	2,000 美元
初始成本总计			3,505 美元	15,575 美元	62,500 美元

下一页 

年度经常性成本	估计单位成本	单位成本	示例		
			生命周期成本： 1台	生命周期成本： 10台	生命周期成本： 50台
年度维护费用： <ul style="list-style-type: none"> ■ 清洁灯具、反射器和装置（每季度至少一次） ■ 灯具更换和处理/回收（每年至少一次） ■ 上层空间紫外线杀菌性能测量 ■ 根据需要更换可用部件（如镇流器、插座、反射器等） ■ 10台及以上可享受10%的折扣，50台及以上可享受20%的折扣 	单价的 5 – 15%	100 美元 (10%)	100 美元	900 美元	4,000 美元
年度运行消耗电量 千瓦时*本地用电费率 (千瓦时 = 额定瓦数*24小时*365天/1000W/kW)	0.10 – 0.60 美元/千瓦时	66 美元 (30W, 0.25 美元/kW-h)	66 美元	660 美元	3,300 美元
紫外线杀菌辐照计的校准 每1至2年一次 (可能必须在国外完成)	200 – 600 美元	500 美元 (每年)	500 美元	500 美元	500 美元
年度经常性成本总计			666 美元	2,060 美元	7,800 美元
生命周期成本总计 (生命周期15年) ¹			13,495 美元	46,475 美元	179,500 美元
每台生命周期成本 (生命周期15年) ²			13,495 美元	4,648 美元	3,590 美元

1 生命周期成本总计 = 初始成本 + 年度经常性成本 x 15年。
 1 台: 3,505 + (666 * 15) = 13,495 美元
 10 台: 15,575 + (2,060 * 15) = 46,475 美元
 50 台: 62,500 + (7,800 * 15) = 179,500 美元

2 每台生命周期成本 = 生命周期成本总计 ÷ 装置数量。
 1 台: 13,495 / 1 = 13,495 美元
 10 台: 46,475 / 10 = 4,648 美元
 50 台: 179,500 / 50 = 3,590 美元

如何购买具有已知性能的上层空间紫外线杀菌系统？

预计到2020年初，有限数量的上层空间紫外线杀菌装置可通过全球药物基金（GDF）采购。在适当的规划和倡导下，全球基金、世界银行、美国总统艾滋病紧急救助计划（PEPFAR）、美国国际开发署和其他合作伙伴可以在未来成为这些装置和其他上层空间紫外线杀菌装置的潜在资金来源。

上层空间紫外线杀菌感染预防控制项目应当包含哪些要素？

上层空间紫外线杀菌系统的实施应以健全的行政管理措施为基础。项目要素可包含：实施结核感染预防控制评估、机构风险分区、员工和患者培训、选择上层空间紫外线杀菌装置型号、安装规划、采购用于更换的紫外线杀菌灯具、装置维护、操作、督导与评估。

哪里有关于上层空间紫外线杀菌装置测试和应用的更多信息？

ETTI正在为工程师和建筑师开发更多的技术资料，这些资料将通过实例和个案研究提供更多信息。此外，ETTI还拥有可以提供援助的专家。如需查询，可联系 ETTInitiative@gmail.com。

参考文献

1. World Health Organization. WHO guidelines on tuberculosis infection prevention and control, 2019 update. Geneva: 2019. 网址: <https://www.who.int/tb/publications/2019/guidelines-tuberculosis-infection-prevention-2019/en/>.
2. Escombe AR, Moore DA, Gilman RH, Navincopa M, Ticona E, Mitchell B, et al. Upper-room ultraviolet light and negative air ionization to prevent tuberculosis transmission. PLoS Med. 2009;6(3):e43.
3. Mphahlele M, Dharmadhikari AS, Jensen PA, Rudnick SN, van Reenen TH, Pagano MA, et al. Institutional Tuberculosis Transmission. Controlled Trial of Upper Room Ultraviolet Air Disinfection: A Basis for New Dosing Guidelines. Am J Respir Crit Care Med. 2015;192(4):477-84.
4. Willmon TL, Hollaender A, Langmuir AD. Studies of the control of acute respiratory diseases among naval recruits; a review of a 4-year experience with ultraviolet irradiation and dust suppressive measures, 1943 to 1947. Am J Hyg. 1948;48(2):227-32.
5. Wells WF, Wells MW, Wilder TS. The environmental control of epidemic contagion: I. An epidemiological study of radiant disinfection of air in day schools. American Journal of Epidemiology. 1942;35(1):97-121.
6. World Health Organization. Guidelines on core components of infection prevention and control programmes at the national and acute health care facility level. Geneva: 2016. 网址: <https://www.who.int/gpsc/ipc-components-guidelines/en/>.
7. End TB Transmission Initiative. Maintenance of upper-room germicidal ultraviolet (GUV) air disinfection systems for TB transmission control. Geneva: 2017. 网址: <http://www.stoptb.org/wg/ett/assets/documents/MaintenanceManual.pdf>.



更多参考资料

世界卫生组织感染预防控制评估框架:

<https://www.who.int/infection-prevention/tools/core-components/IPCAF-facility.pdf>

2019 ASHRAE Handbook — HVAC Applications: Chapter 62 Ultraviolet Air and Surface Treatment. ASHRAE, Georgia: USA.



本文件是在“遏止结核病合作伙伴关系”终止结核传播倡议行动 (ETTI) 工作组和美国国际发展署 (USAID) 的支持下制定而成, 相关合作协议编号为 STBP/USAID/GSA /2018-04。中文翻译: 中国疾控中心结核病防治临床中心、首都医科大学附属北京胸科医院