DOI:10.12138/j.issn.1671－9638.20263001

·论著·

222 nm 紫外线上层平射对某三级甲等传染病医院气管镜室空气动态消毒效果评价

龚媛媛[1]，张　芸[1]，沈兴华[2]，张建平[2]
（苏州市第五人民医院 1.感染管理部；2. 结核病科，江苏 苏州　215131）

［摘　要］ **目的**　通过对比 222、254 nm 两种波长紫外线上层平射对某三级甲等传染病医院气管镜室不同区域空气的动态消毒效果，为医疗机构特殊诊疗区域的空气消毒提供新思路。**方法**　选取某三级甲等传染病专科医院气管镜室的治疗室和清洗室，第一个工作周在距离地面 2.6 m 高度安装 254 nm 波长的上层平射紫外线空气消毒器，即为对照组；第二个工作周在距离地面 2.6 m 高度安装 222 nm 波长的上层平射紫外线空气消毒器，即为试验组。比较两组空气菌落总数的差异。**结果**　试验组在气管镜室清洗室和治疗室空气平均菌落数均低于对照组（均 $P<0.05$），并在全时段维持较低水平。对照组和试验组的动态空气菌落总数合格率均为 100%。对照组符合Ⅰ类环境等级时间占比为 87.5%，试验组为 100%。**结论**　222 nm 波长较 254 nm 波长紫外线上层平射更能提升动态空气菌落总数合格率，改善气管镜室环境，持续照射有助于保持空气安全性和洁净程度。

［关　键　词］ 上层空间；紫外线消毒；传染病医院；气管镜室；空气动态消毒
［中图分类号］ R187.4

Dynamic disinfection effect of 222 nm upper-room ultraviolet irradiation on the air in bronchoscopy room of a tertiary first-class infectious disease hospital

GONG Aiyuan[1], *ZHANG Yun*[1], *SHEN Xinghua*[2], *ZHANG Jianping*[2] (1. *Department of Infection Management*; 2. *Department of Tuberculosis*, *The Fifth People's Hospital of Suzhou*, *Suzhou* 215131, *China*)

［**Abstract**］ **Objective**　To compare the dynamic disinfection effect of upper-room ultraviolet irradiation at 222 nm and 254 nm on the air in different areas of the bronchoscopy room of a tertiary first-class infectious disease hospital, and provide new insights for air disinfection in specialized diagnosis and treatment areas of medical institutions. **Methods**　The treatment room and cleaning room of the bronchoscopy room of a tertiary first-class infectious disease hospital were selected. The upper-room ultraviolet irradiation air disinfectors of 254 nm (as control group) and 222 nm (as test group) were installed at a height of 2.6 meters above the ground in the first and the second working weeks, respectively. Difference in total bacterial colonies in the air between two groups was compared. **Results**　The average bacterial colonies in the air of cleaning room and treatment room of bronchoscopy room in the test group were both lower than those of the control group (both $P<0.05$), and maintained a low level throughout the entire period. The qualified rates of dynamic air bacterial colonies in both the control group and the test group were 100%. The time percentage that the control group met the class I environmental level was 87.5%, while that of the test group was 100%. **Conclusion**　The upper-room ultraviolet irradiation at 222 nm is more effective in improving the qualified rate of dynamic air bacterial colonies and enhancing the environment of the bronchoscopy room compared with upper-room ultraviolet irradiation at 254 nm, and continuous irradiation helps to maintain air

［收稿日期］ 2025－09－23
［基金项目］ 中国公共卫生联盟项目
［作者简介］ 龚媛媛（1992－），女（汉族），江苏省启东市人，主治中医师，主要从事医院感染管理工作方面研究。
［通信作者］ 张建平　　E-mail：zhangjianping_yb@suda.edu.cn

safety and cleanliness.

[**Key words**] upper-room; ultraviolet disinfection; infectious disease hospital; bronchoscopy room; air dynamic disinfection

医院感染防控是保障医疗质量和患者安全的重要环节。在传染病医院的气管镜室,医护人员在进行气管镜等侵入性操作时,长期暴露于可能含有结核分枝杆菌、流行性感冒病毒等病原微生物的环境中,交叉感染风险显著增高[1]。传统空气消毒方法存在局限:化学熏蒸法具有作用间歇期,且可能产生残留物及腐蚀性;而常规使用的 254 nm 波长紫外线,虽具有广谱杀菌能力,但其对人体皮肤和眼睛的潜在损伤限制了其在有人环境下的持续使用[2]。因此,寻求一种能够在动态、持续有人环境下安全有效运行的空气消毒方法至关重要。

近年来,采用上层平射技术的 254 nm 紫外线空气消毒器已能够实现一定程度的"人机共存"[3-7],但为追求更高的生物安全性,222 nm 紫外线被认为对人体皮肤黏膜的伤害风险显著降低,为真正安全地持续动态消毒提供了新的技术方向[8-10]。然而,目前国内对 222 nm 紫外线的研究多集中于对特定微生物的杀灭效果或静态环境评估,其在真实、复杂且分区明确的医疗环境(如传染病医院的气管镜室)中的动态空气消毒效能仍需要进一步探索。本研究旨在评估 222 nm 波长紫外线的上层平射技术在传染病医院气管镜室治疗室(操作区)和清洗室(洗消区)两个功能区域内,在动态工作时段中对空气自然菌的实时清除效果,系统评价其持续消毒能力及安全性优势,从而为优化高风险医疗部门的空气消毒策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

1.1.1 研究区域 本研究选取某三级甲等传染病专科医院气管镜室的治疗室和清洗室为研究现场,清洗室面积 24.4 m^2,高度 2.8 m,体积 68.32 m^3;治疗室面积 23.2 m^2,高度 2.8 m,体积 64.96 m^3。

1.1.2 研究设备 222 nm 紫外线空气消毒器:星际光牌 L500 222 nm 波长空气消毒器(单根灯管标称功率 3W),产品说明要求采取固定式安装,使用空间≤60.8 m^3,安装于墙壁且安装高度≥2.6 m;星际光牌 L310 222 nm 波长空气消毒器(单根灯管标称功率 3W),产品说明要求采取天花板固定安装,使用空间≤30.9 m^3,安装于天花板,天花板离地高度≥2.4 m。

254 nm 紫外线空气消毒器:恒时 H600M 上层平射紫外线空气消毒器(灯管标称功率 25.6W),产品说明要求采取侧墙或中间吊装,使用空间 18～50 m^2,安装高度≥2.43 m。两种仪器均采用上层平射技术,属人机共存设备,可在工作中连续使用,主要差异为波长不同。

1.2 研究方法

1.2.1 基本情况监测 试验期间气管镜室正常工作。记录试验区域的温度、湿度及机械通风的开关状态。气管镜室患者均为预约制,因每日气管镜操作者及镜下治疗类型不同,采用固定预约模式,每周同一天的人数基本持平,但每周不同日期的人数有明显差异,因此本研究选择两个工作周分别使用两种消毒方式进行消毒效果比较。

1.2.2 消毒器安装与分组 根据各区域建筑布局、诊疗流程、患者流量等,结合实际工作需求,设置试验位置、设备型号及使用数量。第一个工作周,在清洗室和治疗室,距离地面 2.6 m 高度各安装了 2 台恒时 H600M 上层平射紫外线空气消毒器,即为对照组;第二个工作周,在清洗室和治疗室,距离地面 2.6 m 高度各安装了 1 台星际光牌 L500 222 nm 波长空气消毒器和 1 台星际光牌 L310 222 nm 波长空气消毒器,即为试验组。安装的设备数量和位置均符合说明书消毒空间要求,确保覆盖风险区域范围。

1.2.3 消毒方案 第一个工作周,周一至周三开启 254 nm 波长的上层平射紫外线空气消毒器,连续试验 3 d;第二个工作周,周一至周三开启 222 nm 波长的上层平射紫外线空气消毒器,连续试验 3 d。试验日每天 8∶00 开启消毒设备,并至少保持开启直至当日最后一组空气采集完毕。试验过程中,试验区域不再使用其他空气消毒设备。

1.2.4 采样方法 每个试验日 9∶00～16∶00 进行空气采样,每间隔 1 h 采样 1 次,每次采集 10 min,每天重复采集 8 次。参考 GB 15982—2012《医院消毒卫生标准》[11]、GB 28235—2020《紫外线消毒器卫生要求》[12],使用安德森六级筛孔撞击式微生物采样法进行采样,将采样器置于室内中央,采集器置于 1 m 高度,打开对应编号的采集器盖子,

采集流量设定为 28.3 L/min，定时 10 min，采集 10 min 后，无菌操作取出普通营养琼脂培养皿（Φ90 mm，郑州安图生物工程股份有限公司），随即盖上培养皿盖，送入恒温箱培养，并记录采样区域对应时段的温度、湿度、诊疗操作、人员流量等信息。本研究通过该医院伦理审查（伦理审查编号：L-2025-0007）。

1.3　评价指标　根据 GB 15982—2012《医院消毒卫生标准》[11]，通过空气平均菌落数对应的环境类别评价消毒后的空气质量，并按照平板暴露法计算公式，将不同环境类别菌落数转换为空气细菌总数进行判定。Ⅰ类环境菌落数≤150 CFU/m³；Ⅱ类环境菌落数≤210 CFU/m³；Ⅲ类环境菌落数≤629 CFU/m³。空气菌落总数：各采样时间点检测的空气菌落总数；空气平均菌落数：采用线性混合效应模型校正后的边际均值（±标准误）表示。动态空气菌落总数合格率以Ⅲ类环境标准为合规判定依据。同时，为比较两种消毒设备的消毒程度差异，引入Ⅰ类和Ⅱ类环境标准作为效果比较的参考等级，不纳入合格率判定。

1.4　统计学分析　数据采用 Excel 表整理，应用 SPSS Statistics 32.0 进行统计分析，计数资料采用例数和率描述，组间比较采用 χ^2 或 Fisher 确切概率检验。空气菌落数采用线性混合效应模型（LMM）分析，固定效应为组别和时间点，随机效应为天的随机截距，重复测量时间点采用 AR(1) 协方差结构，数据为连续 3 d、每天 8 个时间点（9：00～16：00）的原始空气菌落数（CFU/m³），以 P≤0.05 为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　试验区域基本情况　试验期间，清洗室和治疗室的平均温度为 22～25℃，平均湿度为 36%～54%。机械通风的开关状态均一致。两组气管镜检查患者的基本情况比较差异均无统计学意义（均 P>0.05），见表 1。对照组试验 3 d 的患者数量分别为 11、25、20 例，试验组试验 3 d 的患者数量分别为 13、22、23 例。8：00～10：00 清洗的内镜数量较多，随后呈现下降趋势，见图 1。

表 1　气管镜检查患者的基本情况[例(%)]

Table 1　Basic information of patients undergoing bronchoscopy examination (No. of cases [%])

特征	试验组（n = 58）	对照组（n = 56）	χ^2	P
性别			0.572	0.449
男性	30(51.72)	25(44.64)		
女性	28(48.28)	31(55.36)		
年龄（岁）			-	0.882[a]
≤14	1(1.72)	1(1.79)		
15～34	19(32.76)	15(26.78)		
35～59	17(29.31)	21(37.50)		
60～74	17(29.31)	14(25.00)		
≥75	4(6.90)	5(8.93)		
咳嗽			1.084	0.298
有	49(84.48)	43(76.79)		
无	9(15.52)	13(23.21)		
痰或支气管肺泡灌洗液找抗酸杆菌			0.935	0.334
阴性	30(51.72)	34(60.71)		
阳性	28(48.28)	22(39.29)		

注：a 表示采用 Fisher 确切概率检验；- 表示无数据。

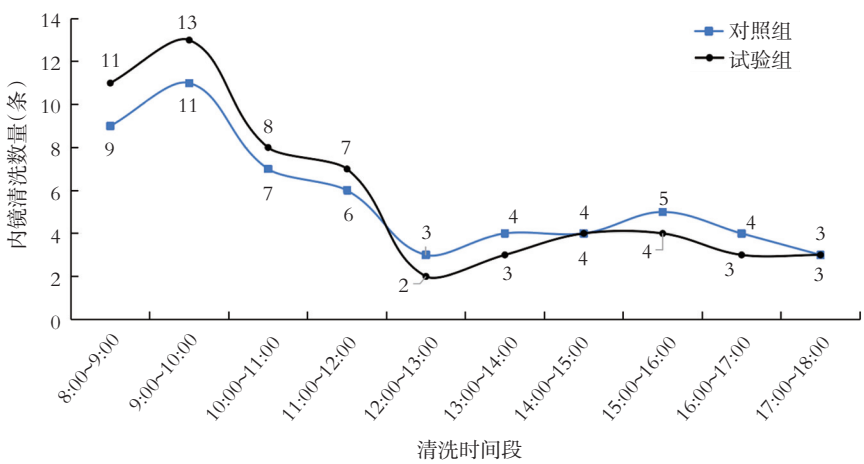


图 1　气管镜室不同采样组不同时间段清洗的内镜数量变化

Figure 1　Changes in the number of endoscopes cleaned in different sampling groups and time periods in the bronchoscopy room

2.2　气管镜室不同区域空气菌落总数随时间变化　在各采样时间点，试验组空气菌落总数低于对照组。清洗室和治疗室两个区域 68.75% 的采样时间，对照组的空气菌落总数是试验组的 2 倍及以上。与对照组相比，试验组在两个区域均维持较低水平。在时间动态上，试验组在两个区域的峰值均出现在 9：00，随后呈下行态势，但清洗室在 14：00 出现反跳，治疗室在 11：00、13：00 及 15：00 观察到波动性升高。见图 2、3。

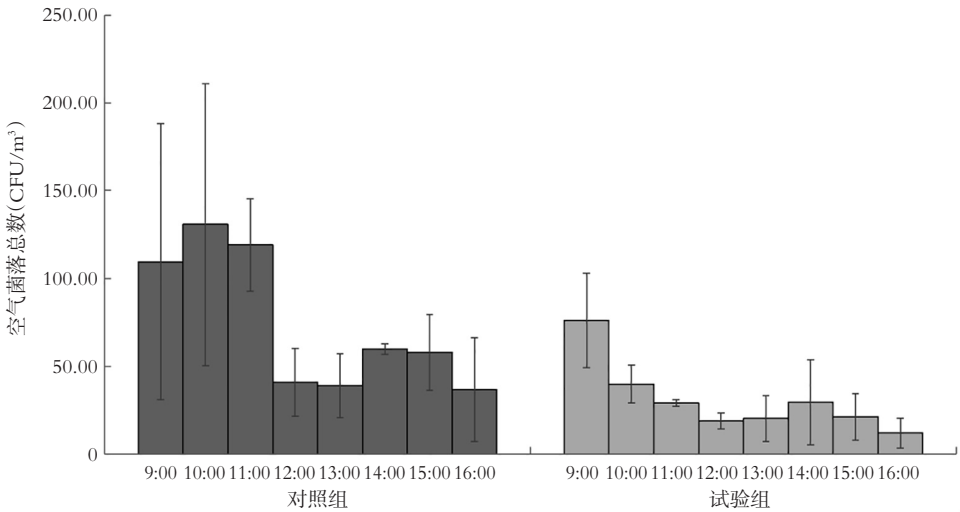


图 2　清洗室不同采样组空气菌落总数随采样时间变化情况

Figure 2　Change in the total number of bacterial colonies in the air in different sampling groups of the cleaning room over sampling time

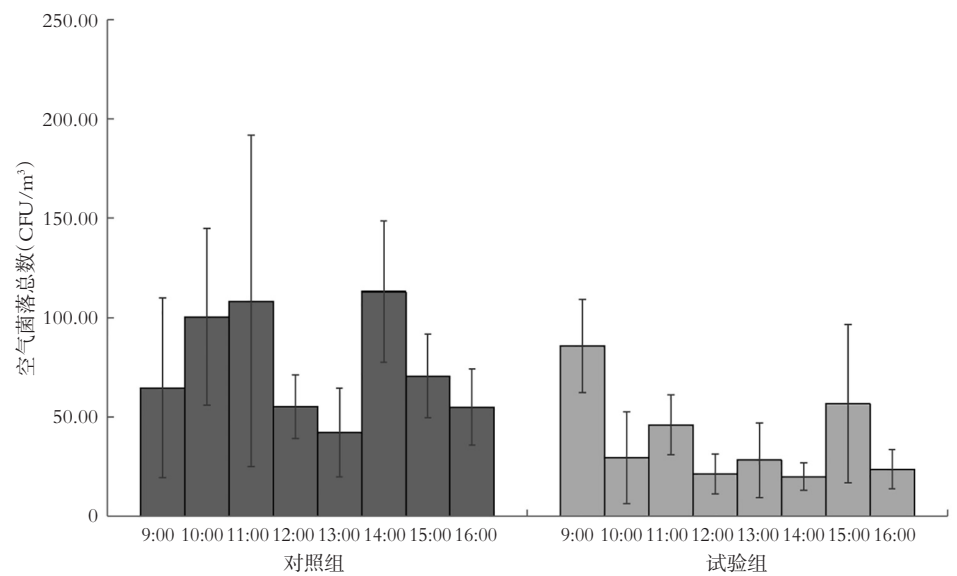


图 3　治疗室不同采样组空气菌落总数随采样时间变化情况

Figure 3　Change in the total number of bacterial colonies in the air in different sampling groups of the treatment room over sampling time

2.3　空气平均菌落数和动态空气菌落总数合格率比较　试验组清洗室和治疗室的空气平均菌落数数值均低于对照组，但仅治疗室差异有统计学意义（$P=0.001$），见表 2，此差异可能与两个房间的数据变异程度不同有关。清洗室对照组在不同测量日间的菌落数波动较大，导致模型估计的标准误增大，置信区间变宽，检验效能降低。相比之下，治疗室的数据变异相对稳定，模型对组间差值的估计更为精确，因而能够检测出统计学显著差异。对照组和试验组的动态空气菌落总数合格率均为 100%。

表 2　试验组和对照组不同区域空气平均菌落数比较

Table 2　Comparison of average bacterial colonies in the air in different areas in the test group and control group

区域	空气平均菌落数(CFU/m³)		组间差值(95%*CI*)	*P*
	试验组	对照组		
清洗室	32.6±13.6	72.7±13.6	40.1(−6.1,86.3)	0.078
治疗室	38.4±13.4	76.7±13.4	38.3(18.2,58.3)	0.001

2.4　不同组别不同区域环境类别情况　对照组：清洗室符合Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类环境标准的时间段占比分别为 87.5%、4.17%、8.33%；治疗室符合Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类环境标准的时间段占比分别为 87.5%、8.33%、4.17%。试验组：清洗室和治疗室符合Ⅰ类环境标准的时间段占比均为 100%。见图 4。

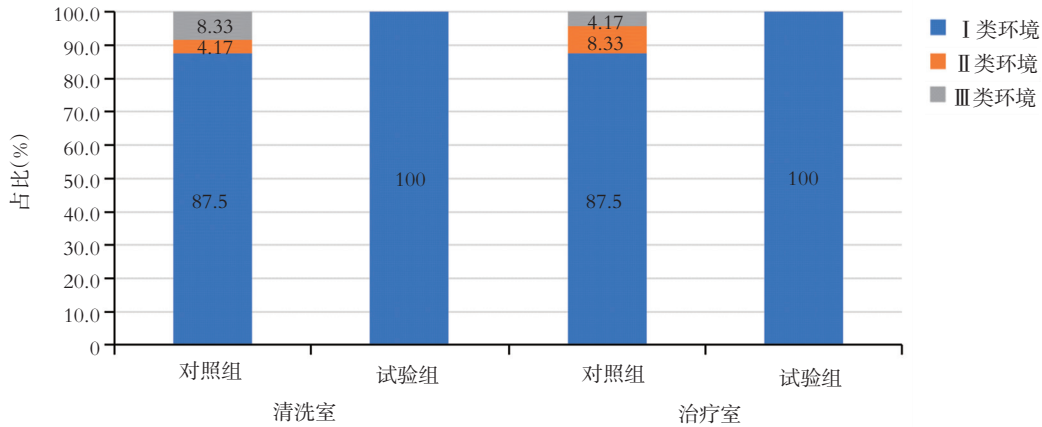


图 4　两组在不同区域中符合Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类环境标准的时间占比比较

Figure 4　Comparison of time percentages of the two groups meeting class Ⅰ, Ⅱ, and Ⅲ environmental standards in different areas

3　讨论

本研究通过在上层空间分别安装 222 nm 与 254 nm 紫外线消毒器，在正常诊疗操作的工作环境下比较空气消毒效果。结果显示，试验组在不同区域各采样时段的空气平均菌落总数均低于对照组（均 $P<0.05$），两种波长紫外线在 8：00～10：00 时间段的空气平均菌落总数均处于高峰，结合不同时间段内镜清洗数量变化，考虑可能与 8：00～10：00 内镜清洗数量较多有关。通过与气管镜室沟通发现，本次试验期间，9：00～10：00 及 14：00～15：00 以气管镜下治疗为主，包括冷冻治疗、支气管镜下热消融术、支气管镜下球囊扩张术、支气管镜下注射抗结核药物等，其余时间段以气管镜下检查为主，图 3 中出现高峰的时段与此有一定的相关性。总体看来，试验组在降低空气菌落总数及维持Ⅰ/Ⅱ类环境等级的时间占比均优于对照组，在气溶胶产生高峰时段仍能保持稳定的消毒效能，这一优势与 222 nm 紫外线更接近微生物核酸吸收峰的光生物学特性相关[13]。Eadie 等[14]研究也支持持续低剂量 222 nm 照射可显著降低空气中活菌浓度。

从临床实践角度看，动态消毒是本研究的核心价值所在。紫外线上层平射利用室内空气自然对流，实现室内全部空气的循环消毒[15-16]，能在不影响诊疗操作的前提下实现空气的实时净化。气管镜室属于Ⅲ类环境，试验组和对照组均达到环境空气菌落总数卫生标准，但对照组在维持Ⅰ类、Ⅱ类环境空气标准的时间占比上低于试验组，意味着对照组在持续工作状态下微生物重新累积更多，安全性稍低于试验组。尽管 254 nm 紫外线通过上层平射也可降低人员暴露风险，但 222 nm 波长在安全性方面的显著优势使其具备更宽的操作窗口和更低的职业健康顾虑[8-10]。目前，222 nm 紫外线的经济成本更高，与 254 nm 紫外线相比存在显著差异，但 222 nm 紫外线是近年的新技术，从长期来看可能更具效益优势。

本研究存在一定局限：未实时监测人员活动与气溶胶产生的定量关系，未鉴定空气中微生物的具体种类及其对紫外线的敏感性差异，仅在单一场景进行测试。未来需开展多中心研究，并结合感染发病率等临床终点指标进一步验证其长期效益。综上所述，222 nm 紫外线在上层平射应用模式下，为气管镜室等高风险环境提供了一种安全、高效的持续

空气消毒解决方案，具有较好的临床推广前景。

作者贡献：

龚媛媛负责研究方案/试验规划、现场数据采集与分析、图表绘制、初稿与投稿。张芸负责方案设计与流程优化、部分数据采集与样本处理、设备调试与质控、初稿修订。沈兴华负责关键技术与材料、数据解读与结果论证、行政与伦理协调、论文审阅。张建平负责总体思路与研究设计、数据分析指导、论文审核与学术把关。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

[参 考 文 献]

[1] 杨能禄. 负压吸气换气杀毒机在支气管镜室维持空气洁净效果的研究[D]. 衡阳：南华大学，2023.
Yang NL. Study on air cleaning effect of the negative pressure inhalation and ventilation anti-virus machine in bronchoscope room[D]. Hengyang: University of South China, 2023.

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

[3] 李楠楠，林泓怡，生媛，等. 手术室上层平射紫外线空气消毒效果的探讨[J]. 中国消毒学杂志，2021，38(5)：330－333.
Li NN, Lin HY, Sheng Y, et al. Analysis on the effect of upper-level flat ultraviolet radiation on air disinfecton in operating room[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2021, 38(5): 330－333.

[4] Hakim H, Gilliam C, Tang L, et al. Effect of a shielded continuous ultraviolet-C air disinfection device on reduction of air and surface microbial contamination in a pediatric oncology outpatient care unit[J]. Am J Infect Control, 2019, 47(10): 1248－1254.

[5] 程实，徐玢，杜岳，等. 222 nm 紫外线上层平射对北京市某三级甲等医院急诊科空气的动态消毒效果[J]. 上海预防医学，2024，36(9)：836－841，853.
Cheng S, Xu F, Du Y, et al. Dynamic disinfection effect of the upper-room 222 nm ultraviolet radiation on the air in the emergency department in a tertiary general hospital in Beijing, China[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2024, 36(9): 836－841, 853.

[6] Lee LD, Lie L, Bauer M, et al. Reduction of airborne and surface-borne bacteria in a medical center burn intensive care unit using active, upper-room, germicidal ultraviolet (GUV) disinfection[J]. Infect Control Hosp Epidemiol, 2024, 45(3): 367－373.

[7] 张玉成，施婷婷，于雪源，等. 上层平射紫外线空气消毒器对医院门诊诊室空气的消毒效果研究[J]. 中国消毒学杂志，2024，41(10)：734－736.
Zhang YC, Shi TT, Yu XY, et al. Study on the effect of upper flat shot ultraviolet disinfector on air disinfection in consulting rooms of hospital outpatient clinics[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2024, 41(10): 734－736.

[8] 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]. J Appl Microbiol, 2023, 134(3): lxad046.

[9] 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 One, 2020, 15(8): e0235948.

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

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 医院消毒卫生标准：GB 15982—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
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 standard for disinfection in hospitals: GB 15982－2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

[12] 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.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Hygienic requirements for ultraviolet appliance of disinfection: GB 28235－2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

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

[14] Eadie E, Barnard IMR, Ibbotson SH, et al. Extreme exposure to filtered far-UVC: a case study[J]. Photochem Photobiol, 2021, 97(3): 527－531.

[15] Linnes JC, Rudnick SN, Hunt GM, et al. Eggcrate UV: a whole ceiling upper-room ultraviolet germicidal irradiation system for air disinfection in occupied rooms[J]. Indoor Air, 2014, 24(2): 116－124.

[16] Miller SL. Upper room germicidal ultraviolet systems for air disinfection are ready for wide implementation[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2015, 192(4): 407－409.

（本文编辑：左双燕）

本文引用格式：龚媛媛，张芸，沈兴华，等. 222 nm 紫外线上层平射对某三级甲等传染病医院气管镜室空气动态消毒效果评价[J]. 中国感染控制杂志，2026，25(6)：854－859. DOI：10.12138/j.issn.1671－9638.20263001.

Cite this article as: GONG Aiyuan, ZHANG Yun, SHEN Xinghua, et al. Dynamic disinfection effect of 222 nm upper-room ultraviolet irradiation on the air in bronchoscopy room of a tertiary first-class infectious disease hospital[J]. Chin J Infect Control, 2026, 25(6): 854－859. DOI: 10.12138/j.issn.1671－9638.20263001.