

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2023.13.002

基于功能催化剂的多因子消毒器对微生物气溶胶消毒效果*

康欣可¹ 冯宁宁¹ 胡涛¹ 童家鑫² 武海艳¹ 谢建平^{1Δ}

(1 中南大学资源加工与生物工程学院 湖南 长沙 410083; 2 中南大学粉末冶金研究院 湖南 长沙 410083)

摘要 目的:利用空气消毒器能有效控制病原微生物在空气中的传播,但催化剂添加及多因子协同消杀的必要性及效果尚不明确。**方法:**利用多因子消毒器,以白色葡萄球菌为指示菌,在 30 m³ 标准试验舱开展了臭氧、紫外线、臭氧催化、紫外光催化、HEPA 过滤等单一消杀因子及多因子协同消杀气溶胶中微生物的研究。**结果:**分别添加臭氧催化剂、光催化剂较单一臭氧、紫外线消杀率提高 12.9%和 11.33%;在多因子消杀中,协同臭氧催化-紫外光催化-HEPA 过滤的多因子消杀较单一因子消杀率分别提高 10.58%、36.37%、53.67%。此外,随着相对湿度从 40%增加至 80%,臭氧消杀率提高 3.67%,而紫外线消杀率下降 6.76%;随着设备风速由 1.1 m/s 增加到 1.9 m/s,臭氧、紫外线、HEPA 过滤的消杀率分别提高 2.95%、8.08%和 46.09%;臭氧发生量由 5 g/h 提高至 10 g/h 时,消杀率提高 12.87%。**结论:**催化剂添加及多因子协同能提升消毒器的消杀效率,环境相对湿度、消毒器风速等因素会显著影响消毒器消毒效果。

关键词:消毒器;空气微生物消毒;多因子协同;臭氧催化;紫外光催化

中图分类号:X51;X17 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2023)13-2407-05

Effect of Multi-factor Sterilizer on Microbial Aerosol Disinfection Based on Functional Catalyst*

KANG Xin-ke¹, FENG Ning-ning¹, HU Tao¹, TONG Jia-xin², WU Hai-yan¹, XIE Jian-ping^{1Δ}

(1 School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China;

2 Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China)

ABSTRACT Objective: Using air sterilizer can effectively control the spread of pathogenic microorganism in the air. However, the necessity and effect of catalyst addition and multi-factor synergistic disinfection are still unclear. **Methods:** Using a multi-factor sterilizer and staphylococcus albus as indicator bacteria, the study of single sterilizing factor such as ozone, ultraviolet, ozone catalysis, ultraviolet photocatalysis, HEPA filters and multi-factor synergistic of microorganisms in aerosol was carried out in 30 m³ standard laboratory. **Results:** Compared with single ozone and ultraviolet, the disinfection rates of ozone catalyst and ultraviolet catalyst were increased by 12.9% and 11.33%. The multi-factor disinfection rate of synergistic ozone catalysis, ultraviolet photocatalysis and HEPA filters increase by 10.58%, 36.37% and 53.67%, compared with that of single factor. In addition, as the relative humidity increased from 40% to 80%, the ozone disinfection rate increased by 3.67%, while the UV disinfection rate decreased by 6.76%. As the wind speed of the equipment increased from 1.1 m/s to 1.9 m/s, the disinfection rates of ozone, ultraviolet and HEPA filters increased by 2.95%, 8.08% and 46.09%, respectively. When ozone generation increase from 5 g/h to 10 g/h, the disinfection rate increased by 12.87%. **Conclusions:** Multi-factor synergy and catalysts addition can significantly improve the disinfection efficiency of sterilizer, and factors such as environmental relative humidity and wind speed of the sterilizer will significantly affect the disinfection effect of the sterilizer.

Key words: Sterilizer; Air microbial disinfection; Multifactor synergistic; Ozone catalysis; Ultraviolet photocatalysis

Chinese Library Classification(CLC): X51; X17 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2023)13-2407-05

前言

历史上由病原微生物感染引起的大型传染病的传播给全球人类带来了巨大的灾难,有报道表明,因病原微生物感染死亡的人数超过了战争、恐怖主义和大规模毁灭性武器造成的死

亡人数^[1]。已证实非典和新冠肺炎疫情的病毒是通过气溶胶的形式传播^[2,3],全球超过 20%的呼吸道感染是由其引起的^[4],对人体健康造成巨大的威胁^[5,6]。因此,通过对空气进行消毒是有效切断病原微生物传播的关键之一。目前,主要的空气消毒技术主要有过滤截留、紫外辐射、臭氧、催化、化学消毒剂等^[7-14],实际

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51871250);云南省重大科技专项计划(202102AB080007);

中南大学研究生自由探索创新项目(506021753)

作者简介:康欣可(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向:微生物炭催化材料制备与应用,E-mail: kangxinke@csu.edu.cn

Δ 通讯作者:谢建平(1979-),男,博士生导师,教授,主要研究方向:环境微生物,E-mail: xiejianping@csu.edu.cn

(收稿日期:2023-04-10 接受日期:2023-04-30)

应用过程中以单一的消毒技术为主。然而,在实验阶段,多因子协同消毒比单因子消毒效果好^[15,21]。但在实际空气消毒中,催化剂添加和多因子协同消毒对空气消毒的作用效果尚不明确。因此,本研究利用集成臭氧、臭氧催化剂、紫外线、紫外光催化剂、HEPA 过滤的多因子空气消毒器进行白色葡萄球菌(*Staphylococcus albus* 8032, *S.albus* 8032)的消杀,探究单个消杀因子和多因子协同对室内空气的 *S.albus* 8032 消杀效果,分析空气中环境湿度(Relative humidity, RH)、设备风速等因素对消杀效果的影响。本研究为空气消毒器的开发和应用提供重要依据。同时,可为病原微生物的消杀提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验仪器:按照《GB/T18801-2015 空气净化器》建造的 30 m³ (3.5 m × 3.4 m × 2.5 m) 试验舱、TK-3 型气溶胶发生器、ZR-2000 型 Andersen 六级空气微生物采样器。

试验菌种:白色葡萄球菌 8032(*Staphylococcus albus* 8032, *S.albus* 8032)。

空气消毒器:由臭氧、臭氧催化剂、紫外线、紫外光催化剂、HEPA 过滤等多个消杀因子构成的多因子消毒器,设备可单独启动单一消杀因子,可调节风速,可调节臭氧发生量。

1.2 试验方法

1.2.1 菌悬液制备 在超净工作台中,将 *S.albus* 8032 接种于营养琼脂斜面培养基,于 37℃ 培养 18 h~24 h,用含有 3% 的蛋白胨无菌水洗下菌苔并稀释成菌悬液,菌悬液含菌量控制范围为 5 × 10⁴~5 × 10⁶ cfu/m³。

1.2.2 空气染菌和采样 两间 30 m³ 的试验舱分别为试验组和对照组,控制室内温度为 23℃ ± 2℃,相对湿度根据试验设计调整在 40%~80%,两舱内条件保持一致。将准备好的菌悬液装入气溶胶发生器中喷雾染菌 10 min,采用空气循环扇搅拌和静置各 5 min,完成空气染菌;采样时,将六级 Andersen 采样器置于室中央 1 m 高处采样,采样流量为 28.3 L/min,采样时间 1 min,采样后,将采得的平板放在 37℃ 的恒温培养箱中培养

16 h~20 h,计数每个平板的菌落数,取未用的同批培养基 2 份与试验采样的样本同时进行培养,作为阴性对照。计算微生物自然衰减率(公式 1)和微生物消杀率(公式 2),试验重复 3 次,取 3 次实验结果的算术平均值作为最后的试验结果。计算公式如下:

$$\text{自然衰减率}(\%) = \frac{\text{对照组初始菌落数} - \text{对照组结束菌落数}}{\text{对照组初始菌落数}} \times 100\% \quad (\text{公式 1})$$

$$\text{微生物消杀率}(\%) = \frac{\text{试验组初始菌落数}(1 - \text{自然衰减率}) - \text{试验组结束菌落数}}{\text{试验组初始菌落数}(1 - \text{自然衰减率})} \times 100\% \quad (\text{公式 2})$$

1.2.3 单一因子对 *S.albus* 8032 气溶胶消杀效果研究 控制对照组和试验组舱内温度为 23℃ ± 2℃,测试臭氧和紫外线在不同相对湿度下对 *S.albus* 8032 的消杀率、空气消毒器在三种不同风速档位下对 *S.albus* 8032 的消杀率、不同臭氧发生量(5 g/h、10 g/h)的臭氧发生器对 *S.albus* 8032 的消杀率。

1.2.4 多因子协同对 *S.albus* 8032 气溶胶消杀效果研究 控制对照组和试验组舱内温度为 23℃ ± 2℃,相对湿度为 60% ± 5%。测试臭氧催化剂和光催化剂对单一臭氧和单一紫外线照射杀菌能力的强化效果和两种及两种以上消杀因子协同对 *S.albus* 8032 的消杀率。

2 结果

2.1 单一消杀因子对 *S.albus* 8032 气溶胶消杀效果研究

2.1.1 室内相对湿度对单一臭氧和紫外线消杀率的影响 为探究室内环境湿度对消毒效果的影响,分别研究了不同湿度对臭氧和紫外线消毒效果的影响。研究显示,当臭氧消杀 15 min 时,环境相对湿度为 40%、60%、80% 的臭氧对 *S.albus* 8032 的消杀率分别为:95.56%、97.46% 和 99.23%;当紫外线消杀 15 min 时,在三个相对湿度条件下,紫外线对 *S.albus* 8032 的消杀率分别为 93.89%、91.42% 和 87.13%,当相对湿度从 40% 增加到 80% 时,消杀率下降了 6.76%。以上结果表明,随着室内相对湿度增加,臭氧消毒效果增强,紫外线消毒效果下降。

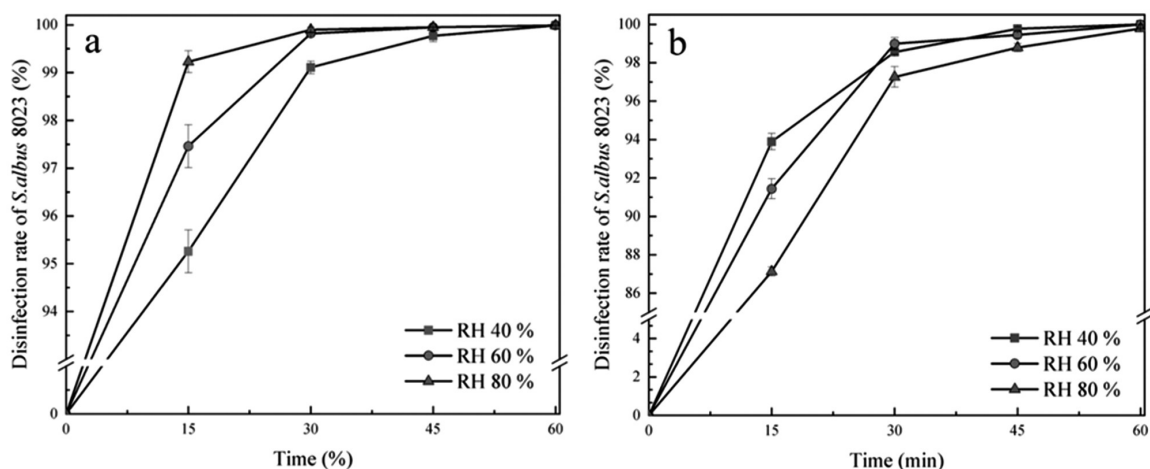


图1 不同相对湿度条件下臭氧和紫外线对 *S.albus* 8032 消杀率(a:臭氧;b:紫外线)

Fig.1 Disinfection rate of *S.albus* 8032 by ozone or ultraviolet under different relative humidity conditions (a: ozone; b: ultraviolet)

2.1.2 空气消毒器风速对三种消杀因子消杀率的影响 为探究不同风速下,臭氧、紫外线和 HEPA 过滤对空气微生物消毒

效果,开展以下研究。研究显示,在空气消毒器低速(1.1 m/s)、中速(1.5 m/s)、高速(1.9 m/s)运转 15 min 时,臭氧对 *S.albus*

8032 消杀率分别是 94.51%、95.23%、97.46%，均处于较高的杀菌水平，紫外线对 *S.albus* 8032 消杀率分别是 83.35%、88%、91.43%，HEPA 过滤对 *S.albus* 8032 消杀率分别为 35.26%、60.21%、81.35%，高风速比低风速杀菌效率提高 46.09%。在同

样风速和处理时间下，臭氧消杀率比紫外线提高 10.06%，比 HEPA 过滤提高 59.25%。以上结果表明，随着空气消毒器风速的提高，臭氧、紫外线和 HEPA 过滤对 *S.albus* 8032 的消杀率均有提升。

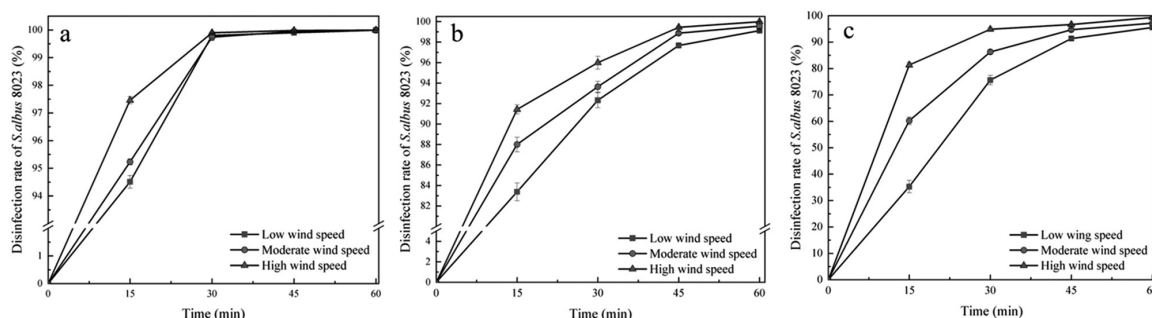


图 2 不同风速条件下臭氧、紫外线、HEPA 过滤对 *S.albus* 8032 消杀率(a:臭氧;b:紫外线;c:HEPA 过滤)

Fig.2 Disinfection rate of ozone, ultraviolet and HEPA filter on *S.albus* 8032 under different wind speed conditions (a: ozone; b: ultraviolet; c: HEPA filter)

2.1.3 臭氧发生量对 *S.albus* 8032 消杀率的影响 探究在不同臭氧浓度下，臭氧对空气微生物的消毒效果。结果表明，在臭氧消杀 10 min 时，5 g/h 和 10 g/h 的臭氧发生器产生的臭氧使室内环境臭氧浓度分别为 1.43 ppm 和 2.5 ppm，对应的消杀率分别为 84.56%和 97.43%，提高了 12.87%，在臭氧消杀 30 min 后，室内环境臭氧浓度分别为 5.07 ppm 和 7.5 ppm，消杀率均大于 99.9%。以上结果说明，臭氧浓度越高，臭氧消毒效率越高，消毒时间越短。

2.2 臭氧催化和光催化分别消杀 *S.albus* 8032 的效果研究

为了探究臭氧催化剂和紫外光催化剂对单一因子消杀的强化效果开展试验。研究显示，添加臭氧催化剂和单一臭氧消杀 *S.albus* 8032 10 min 的消杀率分别为 84.56%和 97.46%，臭氧催化剂的添加使消杀率提高了 12.9%；添加光催化剂和单一紫外线照射消杀 *S.albus* 8032 10 min 的消杀率分别为 65.64%和 76.97%，光催化剂的使用使紫外线杀菌性能提高 11.33%。以上结果表明，在实际应用过程中催化剂的添加能明显增强单一

因子的消毒效果。

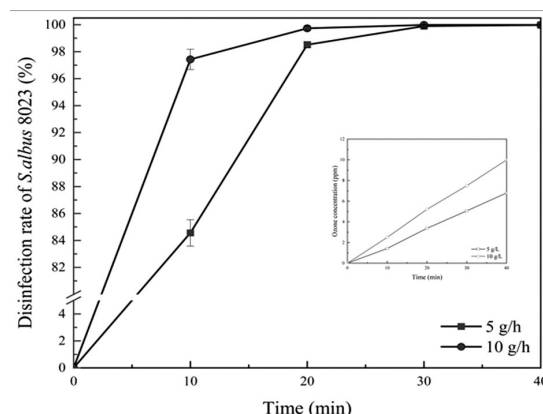


图 3 不同臭氧发生量下的臭氧浓度对 *S.albus* 8032 消杀率

Fig.3 Disinfection rate of *S.albus* 8032 by ozone concentration under different ozone generation

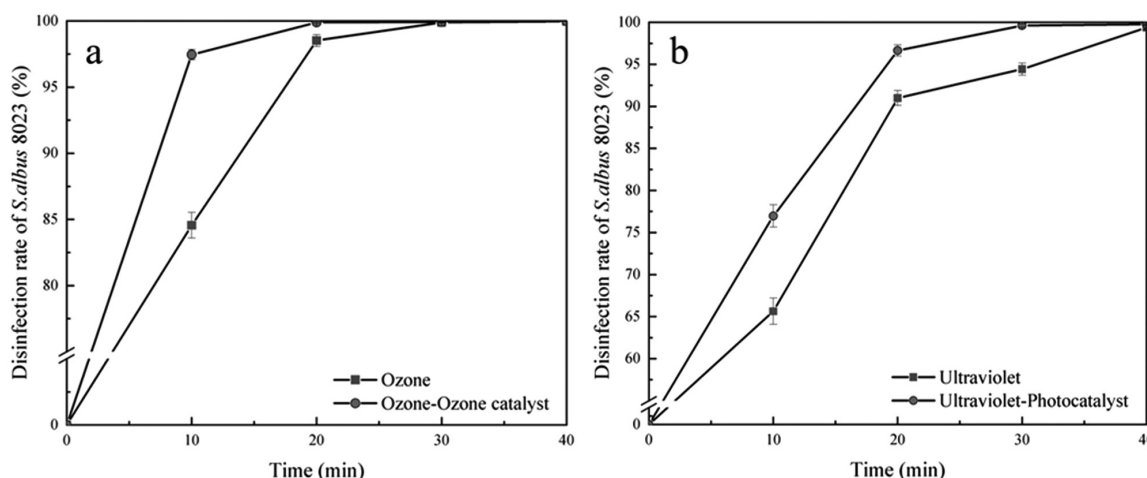


图 4 催化剂的添加对臭氧和紫外线对 *S.albus* 8032 的消杀率的影响(a:臭氧催化剂;b:光催化剂)

Fig.4 Effect of catalyst addition on the Disinfection rate of ozone and ultraviolet on *S.albus* 8032 (a: ozone catalyst; b: photocatalyst)

2.3 多因子协同对 *S.albus* 8032 消杀效果研究

单因子消杀和多因子协同消杀作用效果不同，为探究多因

子协同消杀对空气微生物消毒效果，进行了多因子协同消杀与单因子消杀效果比较。研究显示，在多种因子协同消杀 10 min

时,以臭氧催化-紫外光催化-HEPA 过滤对 *S.albus* 8032 消杀率最高为 95.14%,其次是臭氧-紫外线协同消杀,对 *S.albus* 8032 消杀率为 88.56%。臭氧催化-紫外光催化-HEPA 过滤协同消杀较单一臭氧、紫外线、HEPA 过滤消杀率分别提高 10.58%、36.37%、53.67%。以上结果表明,多因子协同消杀效果明显优于单因子消杀,其中以添加臭氧催化剂、光催化剂的多因子协同消杀效果最优。

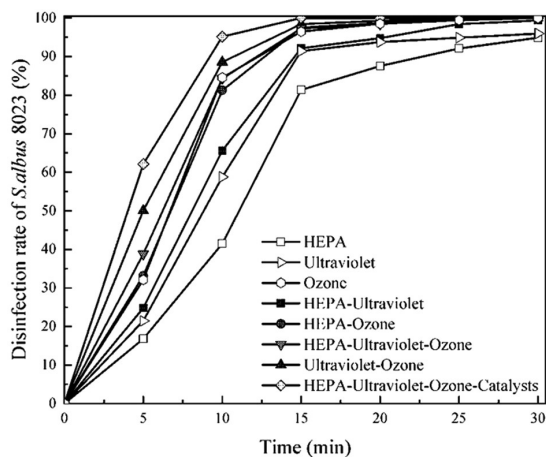


图 5 多因子协同消杀对 *S.albus* 8032 消杀率

Fig.5 Disinfection rate of *S. albus* 8032 by multifactor synergistic

3 讨论

为客观评价各消杀因子对空气中病原微生物的消毒效果,研究催化剂添加及多因子协同等消毒手段对消毒效果影响,同时探究环境相对湿度、设备风速等对臭氧、紫外线、HEPA 过滤消毒效果的影响,以指导在不同环境和应用场景下空气消毒器的开发和应用,本文利用集合臭氧、臭氧催化剂、紫外线、紫外光催化剂、HEPA 过滤的空气消毒器,利用 *S.albus* 8032 为指示菌进行消毒效果测试,结果显示:

催化剂添加可提高室内环境病原微生物的消毒效果,臭氧催化剂、光催化剂的添加比单一臭氧、紫外光消杀率分别提高 12.9%和 11.33%;这一结果与 Huang 等^[19-21]人的研究结果一致,Huang^[19]利用臭氧和催化剂混合系统对室内气溶胶进行控制达到良好的消毒效果;Xu^[20]制备了一种 $\text{TiO}_2\text{-Ag-AgCl}$ 复合光催化剂能有效破坏大肠杆菌生物膜实现消毒;Kang^[21]研究了一种 Ag/TiO_2 NFs 材料对空气中的细菌和病毒均具有显著的灭活能力,在 15 min 时能对大肠杆菌达到 99%的抗菌效率;Jeonghyun Kim^[22]等使用真空紫外光催化灭活空气中的 MS2 病毒表现出比大多数紫外线净化器跟更优异的消毒效果,吴一凡^[23]等人研究了一种光触媒消毒机对室内空气消毒效果,结果表明,消毒机作用 30 min 对实验室内的白色葡萄球菌的杀灭率达到 99.98%。因此,在实际应用过程中,在空气消毒器中适当添加催化剂能达到更明显的消毒效果。

多因子协同消毒效果最优,较单一臭氧、紫外线、HEPA 过滤消杀率分别提高 10.58%、36.37%、53.67%。有多项研究表明,多因子协同消毒效果优于单因子消毒,其中,房小健^[15]研究表明联合臭氧和紫外线的综合杀菌较单独臭氧和紫外线的一次通过杀菌率分别提高 40.2%和 13.2%;周诚^[16]使用臭氧联合二

氧化钛光催化技术在同样的条件下比单一技术消毒效果好;温占波^[26]评价了一种多因子组合型空气净化器对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和白色念珠菌的消毒效果均达到 99%以上;陈贵秋^[27]研究了以过滤、紫外线和光催化组合的空气消毒器在实验室消毒和现场消毒实验中的消毒性能,结果表明该空气消毒器在实验室消毒中对白色葡萄球菌的消杀率为 99.94%,在现场消毒实验中对空气中细菌的消杀率为 95.55%。

相对湿度、设备风速和臭氧浓度对空气消毒影响较大。诸多研究表明增加环境中的相对湿度能显著提高臭氧的消毒效率,而降低紫外线的杀菌率^[15,28,29],房小健^[15]研究了当相对湿度由 55%增加到 90%时,对大肠杆菌的杀菌率减少了 12.3%,而当相对湿度由 55%增加到 90%时,臭氧催化一次杀菌率提高了 6.7%。这是由于相对湿度增加时紫外线辐射被水雾颗粒吸收或发生折射减弱光强增加了微生物的存活率,而湿度的增加反而提高了水分子与臭氧的反应机率,产生氧化性更强的羟基自由基进一步提高消毒效率。臭氧浓度越高,消毒效果越好,Kowalski 等^[30]研究表明臭氧浓度对臭氧灭活微生物效率存在一定的阈值,即当臭氧浓度超过一定范围时微生物的消杀率不会得到明显的提升。

综上所述,在实际空气消毒应用中,多因子协同消毒和催化剂的添加能有效提高空气消毒效果,同时,本研究能为空气消毒器的开发和应用提供依据。同时,可为病原微生物的消杀提供理论指导。

参考文献 (References)

- [1] Bartram J, Lewis K, Lenton R, et al. Focusing on improved water and sanitation for health[J]. Lancet, 2005, 365(9461): 810-812
- [2] Yu I T S, Qiu H, Tse L A, et al. Severe acute respiratory syndrome beyond Amoy Gardens: completing the incomplete legacy[J]. Clinical infectious diseases, 2014, 58(5): 683-686
- [3] Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic analysis of SARS-Cov-2 in two Wuhan hospitals[J]. Nature, 2020, 582(7813): 557-560
- [4] 崔树玉, 李子尧, 孙启华, 等. 臭氧对空气消毒影响因素的研究[J]. 中华医院感染学杂志, 2008, 18(10): 1392-1394
- [5] 杜茜, 温占波, 李劲松. 病毒气溶胶飞沫在室内环境中传播扩散机制的研究进展[J]. 军事医学, 2011, 35(8): 631-633
- [6] 李贤煌, 周梦娇, 毕正琴, 等. 消化内镜中心气溶胶产生及防控策略研究进展[J]. 中国感染控制杂志, 2022, 21(9): 944-950
- [7] Park D H, Joe Y H, Piri A, et al. Determination of Air Filter Anti-Viral Efficiency against an Airborne Infectious Virus [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 396: 122640
- [8] 徐火炬. 静电与电离强化驻极体集尘空气净化技术在民用领域的应用[J]. 洁净与空调技术, 2015 (01): 61-66
- [9] Heilingloh C S, Aufderhorst U W, Schipper L, et al. Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV Irradiation [J]. American Journal of Infection Control, 2020, 48(10): 1273-1275
- [10] Inagaki H, Saito A, Sugiyama H, et al. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation [J]. Emerging Microbes and Infections, 2020, 9(1): 1-8
- [11] Zhang D, Ling H, Huang X, et al. Potential spreading risks and disinfection challenges of medical wastewater by the presence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) viral RNA in septic tanks of Fangcang Hospital [J]. Science of the

- Total Environment, 2020, 741: 140445
- [12] 王妍彦, 李炎, 李涛, 等. 低浓度二氧化氯气体对现场环境自然菌杀菌效果的研究[J]. 中国消毒学杂志, 2019, 36(12): 892-895
- [13] Alimohammadi M, Naderi M. Effectiveness of Ozone Gas on Airborne Virus Inactivation in Enclosed Spaces: A Review Study[J]. Ozone Science and Engineering, 2021, 43(1): 21-31
- [14] Yano H, Nakano R, Suzuki Y, et al. Inactivation of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) by gaseous ozone treatment[J]. Journal of Hospital Infection, 2020, 106(4): 837-838
- [15] 房小健. 紫外线联合臭氧催化对室内空气动态消毒的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013
- [16] 周诚. 臭氧搭配二氧化钛降解室内细菌的实验研究和分析[D]. 华中科技大学, 2014
- [17] Moon E W, Lee H W, Rok J H, et al. Photocatalytic inactivation of viral particles of human norovirus by Cu-doped TiO₂ non-woven fabric under UVA-LED wavelengths [J]. Science of The Total Environment, 2020, 749: 141574
- [18] Li P, Li J, Feng X, et al. Metal-organic frameworks with photocatalytic bactericidal activity for integrated air cleaning [J]. Nature communications, 2019, 10(1): 1-10
- [19] Huang H L, Lee M G, Tai J H. Controlling indoor bioaerosols using a hybrid system of ozone and catalysts [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12(1): 73-82
- [20] Xu X, Wu C, Guo A, et al. Visible-light photocatalysis of organic contaminants and disinfection using biomimetic-synthesized TiO₂-Ag-AgCl composite [J]. Applied Surface Science, 2022, 588: 152886
- [21] Kang S, Choi J, Park G Y, et al. A novel and facile synthesis of Ag-doped TiO₂ nanofiber for airborne virus/bacteria inactivation and VOC elimination under visible light [J]. Applied Surface Science, 2022(599): 153930
- [22] Kim J, Jang J. Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flow-through indoor air purifier with short irradiation time [J]. Aerosol Science and Technology, 2018, 52(5): 557-566
- [23] 吴一凡, 李文豪, 艾乐乐, 等. 一种光触媒消毒机对物体表面和室内空气消毒效果观察[J]. 中国消毒学杂志, 2022, 39(08): 564-566
- [24] Inagaki H, Saito A, Sugiyama H, et al. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation [J]. Emerging Microbes and Infections, 2020, 9(1): 1-8
- [25] Yano H, Nakano R, Suzuki Y, et al. Inactivation of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) by gaseous ozone treatment[J]. Journal of Hospital Infection, 2020, 106(4): 837-838
- [26] 温占波, 王洁, 李劲松, 等. 一种多因子组合型空气净化器对微生物气溶胶净化效果的测试 [J]. 中国消毒学杂志, 2012, 29(05): 367-369
- [27] 陈贵秋, 高琼, 庄世锋, 等. 多因子组合空气消毒器消毒性能的研究 [J]. 中国消毒学杂志, 2008, (06): 601-603
- [28] 张彭义, 李惠南, 杨洁, 等. 臭氧用于空气和表面消毒的研究进展[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(03): 1277-1291
- [29] 王颖. 风管内紫外线动态照射空气消毒技术的研究[D]. 天津大学, 2012
- [30] Kowalski W J, Bahnfleth W P, Striebig B A, et al. Demonstration of a hermetic airborne ozone disinfection system: studies on E.coli [J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 2003, 64 (2): 222-227