

引用格式: 徐文冰, 施红, 胡亮春, 等. 邮轮住舱内病毒的空气传播及抑制方法综述 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(增刊): 63–69.
XU W B, SHI H, HU L C, et al. Review of air transmission and suppression methods of virus on broad in cruise cabin[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(Supp): 63–69.

邮轮住舱内病毒的空气传播及抑制方法综述

扫码阅读全文

徐文冰¹, 施红^{*}, 胡亮春¹, 王均毅¹, 冯毅²

1 江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏镇江 212003

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘 要:邮轮旅游正日益兴起, 但其通风条件差、集聚程度高的特点极易造成病菌的迅速传播, 给公共卫生安全带来了严峻问题。目前, 针对邮轮住舱环境中病毒扩散情况的研究较为匮乏, 不足以形成应对突发传染病事件的完整体系。全面检索有关国内外邮轮住舱环境中病毒传播研究的相关文献, 并进行分类统计与分析。研究发现, 这类文献主要是针对病毒扩散机理和病毒传播抑制方法进行调研, 目前主要研究集中在邮轮中央空调对病毒传播的影响这一问题上。基于上述调研, 展望未来邮轮呼吸道传染病研究的发展趋势, 并对国内外邮轮旅游卫生安全性和突发传染病防治提出若干建议。
关键词: 邮轮; 病毒; 空气传播; 抑制方法; 飞沫
中图分类号: U664.86 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.01949

Review of air transmission and suppression methods of virus on broad in cruise cabin

XU Wenbin¹, SHI Hong^{*}, HU liangchun¹, WANG Junyi¹, FENG Yi²

1 College of energy and power, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212003, China
2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: At present, the increasing rise of cruise tourism has brought serious public health and safety risks due to poor ventilation and high degree of agglomeration. There is a lack of research on the spread of viruses in the cabins of cruise ships, resulting in an inability to form a complete system to deal with the outbreak of infectious diseases. In this paper, the relevant literature on virus transmission in the cabins of cruise ships at home and abroad is surveyed comprehensively, and classified statistics and analysis are conducted. It is found that this kind of literature mainly investigates virus diffusion mechanisms and virus transmission suppression methods. At present, the main research on the impact of virus transmission focuses on central air conditioning in cruise ships. Based on the above research, this paper predicts the future development trends of research on infectious respiratory diseases aboard cruise ships, and makes suggestions for health and safety on cruise ships at home and abroad, and prevention and treatment measures for infectious disease outbreaks.
Key words: cruise ship; virus; air transmission; suppression methods; droplets

0 引 言

在国际交流日益频繁以及居民消费理念转型等原因的驱动下, 邮轮旅游的发展势头持续走高^[1]。

但邮轮载客量大、旅途耗时长、通风条件差、集聚程度高等特点对其公共卫生安全提出了考验。如果防护措施不到位, 邮轮将会成为病菌传播的温床, 从而导致国际间传染病的大型爆发。

收稿日期: 2020-05-04 修回日期: 2020-11-26 网络首发时间: 20xx-xx-xx xx:xx
基金项目: 飞行器环境控制与生命保障工信部重点实验室开放课题资助项目 (KLAECLS-E-202001); 2020 年江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目 (SJCX20_1463)
作者简介: 徐文冰, 女, 1998 年生, 硕士生。研究方向: 船舶空调。E-mail: xwb0127@126.com
施红, 女, 1984 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶空调, 高效换热。E-mail: shihong@nuaa.edu.cn
***通信作者:** 施红

在邮轮中,疾病的主要传播方式包括通过消化道传播的疾病,如霍乱、伤寒等,以及通过呼吸道传播的疾病,如流感、麻疹等。美国疾病控制与预防中心(CDC)曾发布过一篇报告^[2],针对邮轮上常见的传染病进行了阐述。流行病学的研究表明,呼吸道传播疾病是船上人员最大的健康隐患^[3]。有数据显示,在近年的邮轮感染事件中,乘客和船员被感染的总人数已超过6000人^[4]。因此,邮轮密闭空间内由空气传播引起的疾病传播吸引了越来越多学者的关注,成为研究的热点。良好的邮轮人工环境设计在防止病毒传播和保障游客健康安全方面具有重大意义。

1 病毒在空气中传播机理的研究现状

1.1 研究方法

对于病毒在空气中传播的研究,原先多采用流行病传播分析法,该方法由统计概念发展而来,用于分析易感人群的感染风险和病毒的传播概率。Li等^[5]发展了EITS模型并针对直接暴露和间接暴露的感染风险进行了评估;Wells-Riley(W-R)^[6]和Dose-response(D-R)模型^[7]也被广泛用于空气传染病的预测及风险评估中。对于典型感染案例“钻石公主”号,有学者应用W-R模型进行了分析,结果显示该邮轮初期存在飞沫和接触传播,也有可能存在密闭空间的空气传播,才共同导致了超过20%的感染率。Han等^[8]利用D-R模型针对飞机舱内人员的感染风险进行了评估,结果表明,飞机客舱内感染风险的分布与乘客的运动行为密切相关,机组人员和乘客的行走活动会显著增加他们个人的感染风险。Zheng等^[9]结合若干模型针对邮轮中疾病传染的风险进行了评估,指出住舱和餐厅是高风险区域,采取通风、安装高效微粒空气净化器以及佩戴外科医用口罩是较为有效的能够降低感染的措施。就个体而言,采用以上3种方式降低感染风险的概率分别为87.8%、84.9%和20.7%。

病毒感染由人员感染特性、病原体自身的特点、传播环境条件以及人员的活动规律等多种因素共同作用。流行病传播分析法忽略了环境因素等对感染风险的影响,因而分析结果对个体而言过于宽泛,对于室内空气流动优化设计也缺乏指导意义。

当前主流的研究方法有多区模拟法、试验研究法以及计算流体动力学(CFD)仿真模拟法等。多区模拟法因过分简化了系统,会产生很大的误

差,故只适于预测房间分布较均匀的多区建筑通风,而不适合预测建筑内的气流分布^[10]。试验研究法因常受场地、天气等方面的影响而难以实施。CFD方法则凭借其其对微观流动现象强大的捕捉能力弥补了上述研究缺陷,可对密闭空间的气流组织(指对气流流向和均匀度按一定要求进行组织)和污染物扩散进行预测,进而指导研究人员基于扩散规律和流动传热机制进行合理、有效的优化设计。Nielsen^[11]首次将CFD应用于室内气流组织的预测。Topp等^[12]发现,复杂的几何形状对局部计算结果的影响比较明显。Murakami等^[13]利用CFD对人体周围的微气候进行了分析,并对比了不同边界条件带来的影响。Zhang等^[14]对不同通风率处的颗粒扩散情况进行了模拟,并对欧拉和拉格朗日模型进行了评估,认为拉格朗日方法适用于颗粒相稀疏的气-固两相体系,尤其是室内气溶胶颗粒的运动,而欧拉方法则是将颗粒相当作充满整个流场空间的连续介质,其中颗粒相是与流体相相互渗透的拟流体,故拉格朗日方法更适用于非稳态模拟。Li等^[15]采用Eulerian-Eulerian两相流模型模拟了室内颗粒物运动对静坐人员的影响,发现其精确度与使用拉格朗日模型时相当。Inthavong等^[16]选取 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了人鼻腔内飞沫的高速流动。Yousefi等^[17]采用CFD标准 $k-\omega$ 湍流模型模拟了气溶胶在人体肺部的流动情况。曾敏捷等^[18]建立了人体呼吸系统不同部位的理想三维模型,采用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和大涡模拟(LES)方法分别对气流状况及微颗粒沉积率进行了分析。王晋^[19]采用了一种改进后的欧拉模型——drift-flux模型该模型能以简单的形式体现出布朗力、湍流扩散和重力产生的效果,可减少计算机的工作量。Lin等^[20]的研究表明,LES在预测湍流参数时能较好地贴合实验数据。尽管LES可以提供准确而详尽的模拟结果,但耗时远多于RANS模型。混合模型、分离涡模拟(DES)模型和LES模型,究竟哪种算法最适用于邮轮中飞沫传播及气流组织的模拟,还有待进一步的科学论证。

此外,将多区模型与CFD耦合也可能是未来的热点研究方向,但目前研究较少。Qian等^[21]将空气传播的传染病预测模型Wells-Riley方程与CFD结合起来,预测了感染风险(暴露水平)的空间分布,结果显示,近距离的空气传播感染风险远大于远距离的感染风险。Cheong等^[22]结合Wells-Riley方程和CFD,提出了某地特定位置空气传播感染风险的评估方法。Tan等^[23]提出了一种耦合多区模型与CFD模型的方法,并针对大型建

筑空间传染病模拟的情况进行了研究。Jayaraman 等^[24]创造了一种用于耦合多区模型和 CFD 模型的算法,并在一个大空间建筑的二维计算中进行了验证,研究证明,多区模型与 CFD 模型的耦合在对大空间建筑气流与污染物传递的模拟中具有较大的实用价值。但当前在耦合方面的研究较少,需要进一步完善。

1.2 飞沫特性及邮轮舱室内病毒飞沫扩散规律

空气是呼吸系统传染病的主要传播渠道,主要包括飞沫传播与飞沫核传播。目前风靡的 2019-nCoV 病毒是否是通过空气传播仍未定性,但其已成为若干超级传播事件的唯一合理解释^[25]。以“钻石公主号”邮轮为代表的诸多邮轮病毒感染案例更是引发了社会各界对邮轮舱室内病毒空气传播的重视。

飞沫或飞沫核作为病原体的载体,主要为近距离传播,但在密闭空间无风情况下也有可能长距离传播,具有一定的危害性。飞沫传播的影响因素包括飞沫粒径、呼吸状态、室内气流参数、亚微米级的蒸发和人体代谢情况等。有学者研究了日常行为产生的飞沫个数:一个喷嚏约呼出 20~40 万颗飞沫,咳嗽约呼出 10 万颗飞沫,大声说话约呼出 3 000 颗飞沫^[26-27]。也有学者就飞沫直径进行了具体研究,如 Fairchild 等^[28]发现大部分飞沫的直径小于 0.3 μm ; Xie 等^[29]采用显微镜观察,发现飞沫粒径普遍分布在 10~1 000 μm 。对于病毒的直径, Zhu 等^[30]研究表明, 2019-nCoV 的直径约为 60~140 nm。飞沫的粒径与其携带病毒情况有很大关联。对于流感病毒, Lindsley 等^[31]采用 NIOSH 气溶胶采样装置,对志愿者咳嗽产生的飞沫进行了采样分析,发现粒径小于 4 μm 的颗粒中有 65% 携带病毒; Milton 等^[32]采用 G-II 气溶胶采样装置,发现粒径小于 5 μm 的携带病毒的飞沫数量是大于 5 μm 飞沫数量的 8.8 倍,可见小粒径飞沫是流感病毒的重要载体; Roy 等^[33]提出,不同疾病的气溶胶其传播特性不同,结合杆菌仅通过气溶胶传播,麻疹和水痘是以气溶胶作为主要途径的多途径传播。呼出飞沫的物理特性并不是绝对的,飞沫粒特性之间会互相影响。有学者发现,不同的飞沫粒径对其蒸发速度有明显影响:根据 Liu 等^[34]的研究结论,飞沫核在相对湿度 90%、温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 环境下的尺寸比在相对湿度 67.3%、温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 环境下的大 30%。

采用 CFD 研究飞沫的迁移和扩散规律时,大多集中于对人体周围微气候,即对特定室内环境

下人体周围形成的速度场、温度场及浓度场的研究。在微气候研究方面,不少学者指出,人体由于热辐射会产生热羽流,这种现象对空气的吸入起着至关重要的作用。热羽流现象会加剧室内空气在垂直方向上的热分层,所以房间底部区域的空气品质会影响人体吸入空气的质量。Nielsen^[35]提出,当一个健康人面对面向病毒携带者或吸烟者这样的“污染源”靠近时,他们之间的污染物浓度会飙升,尽管室内的通风系统可以提供具有一定动力的气流,但是微环境几乎不受通风的影响,故高浓度污染物无法与新风充分混合,被稀释的可能性很小。可见,微气候研究对保障人体舒适性和安全性具有重要意义。此外,一些研究指出,不同的温度梯度对污染物的传递路径也具有重要影响。有关吸烟者吸入烟气浓度的研究表明,温度梯度差异直接导致了垂直方向上的烟气分层。刘荔等^[36]的研究显示,当温度梯度由 1.5 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 减少到 1.08 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,可以把相距 1 m 的 2 个人中易感者吸入 5 μm 飞沫的数量降低 80% 以上。该研究表明,易感者的感染概率受室内气流组织分布的影响较大,这个观点得到了许多研究者的支持,他们还发现,室内温、湿度将影响飞沫蒸发速度和飞沫核的形成与散布情况。Björn 等^[37]和 Zhou 等^[38]发现,置换送风形式会在室内竖直方向形成温度分层,站立人体呼出的颗粒物在人体呼吸区高度处将达到浓度极大值,也即会出现人体呼出的细小液滴在某一高度空间长时间较高浓度聚集的“自锁现象”。Qian 等^[39]发现,在存在热分层的医院病房中,人体呼吸产生的飞沫沿着呼气方向可以穿过较长的距离并在呼吸高度区域发生停滞,从而大幅增加了人与人之间疾病传播的风险。

由飞沫迁移和扩散规律的研究结果可知,已有的研究多集中在微环境方面,且研究空间大多采用规则的立方体房间,而针对复杂空间内病毒传播特性的研究则较少。考虑到邮轮住舱和餐厅等其他公共区域具有不规则的几何外形和联通形式,气流组织会产生更为复杂的非定常和非均匀化运动,在此情况下,人体热羽流和送风惯性力的相互作用机制可及污染物“自锁”等现象的表现形式将成为一个跨尺度模拟与多因素耦合分析的科学问题。CFD 方法也具有一定的局限性,如在人员活动频繁的场所中,采用 CFD 方法无法准确表达人员动态活动过程中的病毒传播规律,因此,如何将人员动态活动规律与病毒扩散情况相结合也是一个亟待探究的问题。同时,相对于民用建筑,邮轮有其特有的特征,如住舱高度相对于民用建筑较低,回风口通常设计在卫生间或采

用格栅经公共走廊回风的形式,并且在海上航行时邮轮还会面对高湿环境。在这些因素的共同作用下,是否会给病毒传播带来更多的不利因素有待进一步的科学论证。

2 邮轮舱室内病毒的空气传播抑制方法

抑制飞沫传播的工程措施主要有过滤净化、吸附、紫外杀菌(UVGI)和通风等。

过滤净化技术主要是利用各种滤材来净化室内空气,保障人居安全。Qian等^[40]对在隔离病房中使用便携高效空气过滤(HEPA)净化器控制颗粒物浓度的可行性进行了探究,指出在较大流量下,HEPA净化器的射流能够主导病房内的空气流动,并有效降低病房内颗粒物的浓度,虽然存在一些扩散问题,但其滤菌效率已接近100%,是未来抑制邮轮舱室内病毒空气传播的有效途径之一。吸附技术是利用一些多孔性的吸附剂来吸附空气中的有害气体物质,从而达到净化空气的目的,但考虑到吸附剂在工作过程中易产生二次污染,且不能从本质上改变有害物质,故在舒适性的空调系统中应用较少。对于UVGI,相关研究指出,紫外线灯照射30 min可有效去除口罩上的冠状病毒^[41]。UVGI系统使用低压蒸汽汞灯发射短波,通过破坏DNA结构来使微生物无法繁殖而使其失活。Kanaan等^[42]的研究表明,采用安装在房间上部的UVGI装置能够显著降低整个空间中的细菌浓度。Wang等^[43]研究指出,UVGI是灭活空气中微生物的有效方法。虽然UVGI杀伤力大,但其作用效果受多种因素的制约,目前在空调系统中尚未得到应用。

相对于上述方式,通风将成为邮轮密闭空间抑制病毒扩散最有前景的处理方法。一个成功的通风系统一定具有高效的通风效率和优秀的空气排污能力。有文献表明,相比单纯的提高通风换气次数,室内气流从送风口到排风口的流向与污染源之间的空间位置关系更为重要。从通风形式来看,目前主流的通风形式有置换通风和混合通风2种形式。混合通风易造成能源浪费,且对人类健康有不利影响,现已较少采用,而置换通风虽然具有高热舒适性和高通风效率,但常用的置换通风模式更适合于层高较大的房间,在邮轮舱室内的应用具有局限性。而且有研究显示,呼出的污染物会出现分层凝滞现象,有可能直接到达受害者的呼吸区,是置换通风的一种潜在危险。章重洋等^[44]采用分层水箱模拟热分层房间后发

现,呼出的气流穿透羽流边界层后会沿原方向继续传播并产生“滞留现象”,其指出,当滞留高度大于人员呼吸高度时,人员吸入污染物的危险将大幅增加,故应对分层环境中的人体呼出射流进行预测模型构建和对应的试验研究。Olmedo等^[45]对无通风、混合通风及置换通风这3种通风策略下的人体呼气进行了研究,发现采用置换通风时呼气气流较其他通风方式更加水平且速度衰减更慢。Hou等^[46]使用CO₂衰减方法对我国民居的室外空气渗透率做了研究,结果表明,大部分中国人住宅的通风方式是渗透和开窗,然而这样的换气率难以满足健康要求,还需采用机械或自然通风系统。因此在邮轮环境内,密闭空间的通风量必须达到规范数值,否则极有可能产生近距离传播。Lei等^[47]提出了一种通风和拥挤的“配对”原则,即拥挤的房间需要更多的通风。中央空调不同的通风策略会导致结果不同,如带回风运行、带回风运行加过滤和全新风运行这3种策略的防护效率是逐渐升高的。全新风系统向船舶舱室内送入新风,并及时排除污浊气体,保持室内自然舒适的环境,极大程度上避免了交叉感染。我国国务院颁发的《新冠肺炎流行期间办公场所和公共场所空调通风系统运行管理指南》中也明确指出,有新风的集中式空调系统应采用全新风运行。

无论基于何种方式,气流组织在病毒传递途径中均起到了决定性的作用。同时,对于非稳态工况,如果气流组织不够合理,提高通风换气次数对于降低污染物暴露几乎没有作用,甚至还会加大某些区域的暴露量^[48]。因此,准确获取气流组织分布尤为关键。除置换通风和混合通风这2种传统的通风形式外,目前还发展出了一些新的通风理念,如个性送风、个性回风和温差送风等。Xu等^[49]提出,个性化送风是解决在同一密闭空间中减少人员交叉感染概率的一种可能的有效途径。但是相关研究均局限在小尺度颗粒上,针对大尺度飞沫的研究相对较少。同时,个性化送风会增加气流的混合,是否会增加与感染病人同处一室的其他人员的感染率,仍有待进一步探讨。Dyger等^[50]提出了基于个性化座椅回风口的设计理念,其针对飞机经济舱流场的CFD计算表明,相对于传统的通风方式,该方式约可以减少40%~50%的交叉感染风险,并指出该方式有可能是未来密闭空间内污染物快速去除的发展方向。

另外,对于邮轮上的传染病扩散问题,必须做到充分预防,及早控制。某研究指出,如果“钻石公主”号没有及早实施隔离,将会有近80%的乘客和船员被感染;如果邮轮公司在首次检测到呈

阳性反应的案例后立即将人员从船上撤离, 那么将只会有 76 人感染。可见, 有效的隔离措施必不可少。

综上所述, 虽然 HEPA 方法的除菌效率高, 但通风将仍以其简易性和可靠性成为邮轮应对呼吸道传播疾病的具有前景的处理方式。从不同的通风方式下污染物的传播特点来看, 学者们对置换通风带来的气流组织分布的合理性表示了疑虑, 全新风空调方式成为目前应急条件下的主要处理方式。就邮轮的暖通空调设计而言, 全新风空调方式的地位尤显。同时, 个性送风和个性回风也成为值得期许的送风方式。然而, 上述通风方式均未在邮轮的暖通设计中得到优良展现。

3 研究展望

抑制呼吸道传播疾病这一问题涉及到人机环境工程、公共卫生学、医学等多个学科, 从 2003 年的 SARS 到 2020 年的 2019-nCoV, 各学科在各自的领域都取得了长足的发展, 但是由于呼吸道传播疾病具有潜伏性、快速蔓延性等特点, 更需要跨学科交流合作。以感染机理、预测方法及室内环境设计为核心的诸多科学问题亟待多学科进一步合作研究, 从而为实现呼吸道传播疾病的科学感染控制奠定理论基础。在邮轮室内环境工程设计方面, 目前缺乏同时结合室内气流参数、人体代谢模型、人员活动规律和病毒扩散规律的系统研究, 关于送、回风优化设计方面的研究则更为罕见。本文针对已有研究总结如下:

1) 目前在国内外基于 CFD 对病毒飞沫扩散过程的研究中, 研究的对象几何形状简单, 且多为无人员走动的情况; 研究对象所处的环境多为规则的立方体房间, 真正针对邮轮等复杂空间的研究较少。住舱和餐厅等其他公共区域具有不规则的几何外形和联通形式, 气流会产生非定常和非均匀化运动, 进而导致复杂的病毒传播过程, 人体热羽流、气流“自锁”等现象在复杂的非定常湍流模型下的表现形式对邮轮的气流组织设计而言具有极大的探索意义。

2) 尽管很多的规范和标准中提出, 可以通过增加新风量减少回风量的形式来提升室内空气质量进而减少交叉感染, 但上述讨论都是基于经验的, 缺乏精准的定量研究。在邮轮室内环境工程设计方面, 目前缺乏同时结合室内气流参数、人体代谢模型和病毒扩散规律的系统研究, 有关送、回风优化设计方面的研究更是罕见。如何将通风形式和参数引入到病毒扩散的预报中, 阐述

其抑制机理, 并通过一定的算法实现经济、安全、舒适并存的多目标优化是亟待解决的问题。

3) 目前, 针对病毒载体的模拟大多采用固体颗粒模型, 然而实际的飞沫或飞沫核在被病源呼出之后, 在扩散的过程中涉及蒸发的相变过程, 病毒在其传递过程中会发生失活现象。如何恰当地表征上述物理机制是流体动力学模拟值得研究的问题。

4) 在邮轮的室内环境工程设计方面, 目前还缺乏同时结合室内气流参数、人体代谢模型、人员活动规律和病毒扩散规律的系统研究, 而这些影响因素也是室内病毒空气传播研究中无法避免的。如何建立合适的人员社交网络模型, 充分考虑人员活动对病毒空气传播带来的影响, 是以后需要研究的重点。

4 结 语

本文简要介绍了国内外邮轮呼吸道传染病的研究现状, 并总结了已有的抑制病毒传播的方法。经分析得出, 邮轮作为典型的密闭空间, 合理利用空调是防控大型呼吸道传染病的有效手段, 可以采用加大空调系统的新风量, 甚至是采用全新风系统和使用 HPEA 等措施, 并且要特别注意科学的通风措施以及合理的气流组织设计。但在邮轮室内环境工程设计中还缺乏系统的研究, 抑制呼吸道疾病的传播也需要多学科合作, 这些都需要进一步研究与发展。

参考文献:

[1] 张璐璐. 世界邮轮业发展现状 [J]. 世界海运, 2010, 33(12): 10-14.
ZHANG L L. Present situation of cruise industry in world[J]. World Shipping, 2010, 33(12): 10-14 (in Chinese).
[2] CDC. Cruise ship travel[J/OL]. [2020-03-08]. <https://wwwnc.cdc.gov/travel/page/cruise-ship>.
[3] 刘茂华, 戴炎焱, 顾立乾, 等. 邮轮呼吸道传染病爆发发现场检疫管理模式研究 [J]. 口岸卫生控制, 2015, 20(1): 1-4.
LIU M H, DAI Y Y, GU L Q, et al. Research on quarantine administer mode for the locale of respiratory infectious diseases outbreak at the passenger liner[J]. Port Health Control, 2015, 20(1): 1-4 (in Chinese).
[4] 李俊, 韩晓辉, 秦佳, 等. 国际邮轮相关呼吸道传染性疾病的研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(8): 748-751.
LI J, HAN X H, QIN J, et al. International cruise-related respiratory infectious disease: a review of recent

- studies[J]. *Journal of Environment and Health*, 2015, 32(8): 748–751 (in Chinese).
- [5] LI X P, NIU J L, GAO N P. Spatial distribution of human respiratory droplet residuals and exposure risk for the co-occupant under different ventilation methods[J]. *HVAC&R Research*, 2011, 17(4): 432–445.
- [6] RUDNICK S N, MILTON D K. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(3): 237–245.
- [7] HAN Z Y, WENG W G, HUANG Q Y, et al. A risk estimation method for airborne infectious diseases based on aerosol transmission in indoor environment[J]. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2014, 2: 1238–1243.
- [8] HAN Z Y, SZE TO G N S, FU S C, et al. Effect of human movement on airborne disease transmission in an airplane cabin: study using numerical modeling and quantitative risk analysis[J]. *BMC Infectious Diseases*, 2014, 14(1): 434.
- [9] ZHENG L J, CHEN Q Y, XU J, et al. Evaluation of intervention measures for respiratory disease transmission on cruise ships[J]. *Indoor & Built Environment*, 2016, 25(8): 1267–1278.
- [10] 段双平. 基于自然通风的 SARS 传播和自然通风理论研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- DUAN S P. SARS transport on basis of natural ventilation and natural ventilation theory research[D]. Changsha: Hunan University, 2004 (in Chinese).
- [11] NIELSEN P V. Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, 6(S6): S747–S755.
- [12] TOPP C, NIELSEN P V, HEISELBERG P. Influence of local airflow on the pollutant emission from indoor building surfaces[J]. *Indoor Air*, 2001, 11(3): 162–170.
- [13] MURAKAMI S, KATO S. Current status of numerical and experimental methods for analyzing flow field and diffusion field in a room[C]//*Proceedings of the Conference on Building Systems: Room Air and Air Contaminant Distribution*. ASHRAE, Urbana-Champaign, IL, USA: University of Illinois Press, 1988: 39–56.
- [14] ZHANG Z, CHEN Q. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(25): 5236–5248.
- [15] LI X D, YAN Y H, SHANG Y D, et al. An Eulerian–Eulerian model for particulate matter transport in indoor spaces[J]. *Building and Environment*, 2015, 86: 191–202.
- [16] INTHAVONG K, TIAN Z F, LI H F, et al. A numerical study of spray particle deposition in a human nasal cavity[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, 40(11): 1034–1045.
- [17] YOUSEFI M, POURMEHRAN O, GORJI-BANDPY M, et al. CFD simulation of aerosol delivery to a human lung via surface acoustic wave nebulization[J]. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2017, 16(6): 2035–2050.
- [18] 曾敏捷, 胡桂林, 樊建人. 微颗粒在人体上呼吸道中运动沉积的数值模拟 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(7): 1164–1167, 1256.
- ZENG M J, HU G L, FAN J R. Numerical simulation of micro-particle movement and deposition in human upper respiratory tract[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(7): 1164–1167, 1256 (in Chinese).
- [19] 王晋. 人员呼出飞沫蒸发散布过程的仿真研究 [D]. 南京: 东南大学, 2011.
- WANG J. A simulation study on the process of evaporating and dispersing the personnel's exhaled droplets[D]. Nanjing: Southeast University, 2011 (in Chinese).
- [20] LIN C H, HORSTMAN R H, AHLERS M F, et al. Numerical simulation of airflow and airborne pathogen transport in aircraft cabins—Part I: numerical simulation of the flow field[J]. *ASHRAE Transactions*, 2005, 111(1): 755–763.
- [21] QIAN H, LI Y G, NIELSEN P V, et al. Spatial distribution of infection risk of SARS transmission in a hospital ward[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(8): 1651–1658.
- [22] CHEONG HEON C. Case study of airborne infection risk evaluation at spatial area of hospital by using CFD simulation[J]. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment & Building Systems*, 2017, 11(1): 8–13.
- [23] TAN G, GLICKSMAN L R. Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(10): 1049–1057.
- [24] JAYARAMAN B, LORENZETTI D, GADGIL A J. Coupled model for simulation of indoor airflow and pollutant transport: LBNL-56667[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [25] 沈晋明, 刘燕敏. 病毒空气传播争辩新进展 [EB/OL]. [2020-07-13](2020-07-16). <https://mp.weixin.qq.com/s/vkt5-7EldWWnRfLIjsxjiQ>.
- [26] COLE E C, COOK C E. Characterization of infectious aerosols in health care facilities: an aid to effective engineering controls and preventive strategies[J]. *American Journal of Infection Control*, 1998, 26(4): 453–464.
- [27] DUGUID J P. The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei[J]. *Journal of Hygiene*, 1946, 44(6): 471–479.
- [28] FAIRCHILD C I, STAMPFER J F. Particle concentra-

tion in exhaled breath[J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1987, 48(11): 948–949.

[29] XIE X J, LI Y G, SUN H Q, et al. Exhaled droplets due to talking and coughing[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2009, 6(S6): S703–S714.

[30] ZHU N, ZHANG D Y, WANG W L, et al. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019[J]. New England Journal of Medicine, 2020, 382(2): 727–733.

[31] LINDSLEY W G, BLACHER F M, THEWLIS R E, et al. Measurements of airborne influenza virus in aerosol particles from human coughs[J]. PLoS One, 2010, 5(11): e15100.

[32] MILTON D K, FABIAN M P, COWLING B J, et al. Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks[J]. PLoS Pathogens, 2013, 9(3): e1003205.

[33] ROY C J, MILTON D K. Airborne transmission of communicable infection--the elusive pathway[J]. The New England Journal of Medicine, 2004, 350(17): 1710–1712.

[34] LIU L, WEI J, LI Y, et al. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing[J]. Indoor Air, 2017, 27(1): 179–190.

[35] NIELSEN P V. Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2009, 6(S6): S747–S755.

[36] 刘荔, 张毅, 付林志, 等. 热分层环境人间飞沫传染风险与对策研究 [J]. 暖通空调, 2020(6): 19–25, 85.

LIU L, ZHANG Y, FU L Z, et al. Interpersonal droplet transmission risk and countermeasures in thermally stratified environment[J]. HV&AC, 2020(6): 19–25, 85.

[37] BJØRN E, NIELSEN P V. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms[J]. Indoor Air, 2002, 12(3): 147–164.

[38] ZHOU Q, QIAN H, REN H G, et al. The lock-up phenomenon of exhaled flow in a stable thermally-stratified indoor environment[J]. Building and Environment, 2017, 116: 246–256.

[39] QIAN H, LI Y, NIELSEN P V, et al. Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems[J]. Indoor Air, 2006, 16(2): 111–128.

[40] QIAN H, LI Y G, SUN H Q, et al. Particle removal efficiency of the portable HEPA air cleaner in a simulated hospital ward[J]. Building Simulation, 2010, 3(3): 215–224.

[41] 林清, 黄韵芝, 孙桂萍. 新型冠状病毒肺炎疫情中一次性使用医用口罩重复使用及消毒方法的可行性探讨 [J]. 护理管理杂志, 2020, 20(4): 280–284.

LIN Q, HUANG Y Z, SUN G P. Discussion on the feasibility of reuse and disinfection of disposable medical masks in novel coronavirus pneumonia[J]. Journal of Nursing Management, 2020, 20(4): 280–284 (in Chinese).

[42] KANAAN M, GHADDAR N, GHALI K. Localized air-conditioning with upper-room UVGI to reduce airborne bacteria cross-infection[J]. Building Simulation, 2016, 9(1): 63–74.

[43] WANG C, LU S Y, ZHANG Z W. Inactivation of airborne bacteria using different UV sources: performance modeling, energy utilization, and endotoxin degradation[J]. Science of the Total Environment, 2019, 655: 787–795.

[44] 章重洋, 钱华. 分层环境中人体呼出射流预测模型及实验研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(8): 31–35.

ZHANG C Y, QIAN H. Investigations on the dispersion of exhaled flow in stratified environment[J]. Building Energy & Environment, 2019, 38(8): 31–35 (in Chinese).

[45] OLMEDO I, NIELSEN P V, DE ADANA M R, et al. Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies[J]. Indoor Air, 2012, 22(1): 64–76.

[46] HOU J, SUN Y X, CHEN Q Y, et al. Air change rates in urban Chinese bedrooms[J]. Indoor Air, 2019, 29(5): 828–839.

[47] LEI H, XIAO S L, COWLING B J, et al. Hand hygiene and surface cleaning should be paired for prevention of fomite transmission[J]. Indoor Air, 2020, 30(1): 49–59.

[48] MEMARZADEH F, XU W R. Role of air changes per hour (ACH) in possible transmission of airborne infections[J]. Building Simulation, 2012, 5(1): 15–28.

[49] XU C W, LUO X L, YU C, et al. The 2019-nCoV epidemic control strategies and future challenges of building healthy smart cities[J]. Indoor Built Environment, 2020, 29(5): 639–644.

[50] DYGERT R K, DANG T Q. Mitigation of cross-contamination in an aircraft cabin via localized exhaust[J]. Building and Environment, 2010, 45(9): 2015–2026.