

DOI:10.12138/j.issn.1671-9638.20252465

· 综述 ·

医疗建筑内人员肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散的影响研究进展

杨柳清¹,董子妍¹,谢 雯¹,张 悅¹,杨彩青²,周 迎³,郑 琪²,李 节¹

(1. 华中科技大学同济医学院护理学院,湖北 武汉 430030; 2. 北京市建筑设计研究院股份有限公司,北京 100045; 3. 华中科技大学数字建造与工程管理系,湖北 武汉 430074)

[摘要] 感染性呼吸道颗粒经空气传播是引发医院感染的重要诱因。医院内人员活动,如人员移动和开关门操作,会进一步加剧医院感染风险。因此,有必要研究医疗建筑中人员肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散的影响机制,以优化医护操作流程,改进建筑通风设计并完善防控体系。本文系统综述国内外关于人员移动及开关门行为如何影响感染性呼吸道颗粒扩散的研究进展,分析现有挑战并展望未来发展方向,旨在为构建更加高效的医院感染防控体系提供科学依据。

[关键词] 病原微生物; 呼吸道疾病; 医院感染; 扩散; 室内空气; 人员移动; 开关门; 感染性呼吸道颗粒

[中图分类号] R181.3⁺2

Research progress on the influence of physical behavior of personnel in medical buildings on the spread of infectious respiratory particles

YANG Liuqing¹, DONG Ziyan¹, XIE Wen¹, ZHANG Yue¹, YANG Caiqing², ZHOU Ying³, ZHENG Qi², LI Jie¹(1. School of Nursing, Tongji Medical College of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China; 2. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China; 3. Center for Smart and Healthy Buildings, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

[Abstract] Airborne spread of infectious respiratory particles is a significant factor for healthcare-associated infection (HAI). Personnel activities within hospitals, such as personnel movements as well as operations of door-opening and door-closing, can further increase the risk of infection. Therefore, it is necessary to study the effects of physical behaviors of personnel in medical buildings on the spread of infectious respiratory particles, so as to optimize medical procedures, improve building ventilation design, as well as enhance prevention and control systems. This paper systematically reviews the research progresses at home and abroad on how personnel movements as well as door-opening and door-closing behaviors influence the spread of infectious respiratory particles, analyzes current challenges, and looks forward to the future development directions, aiming to provide scientific basis for developing a more efficient HAI prevention and control system.

[Key words] pathogenic microorganism; respiratory disease; healthcare-associated infection; spread; indoor air; human movement; door-opening and door-closing; infectious respiratory particles

航空旅游业的蓬勃发展,新型病原体可在极短的时间内迅速蔓延至全球,进而引发重大突发性公共卫生事件^[1]。此类事件已成为全球经济与安全领

域面临的严峻挑战与重大风险。过去二十年中,高致病性急性呼吸道病毒共引发 6 次全球性的流行病及大流行,导致相关疾病的发病率与死亡率一直居

[收稿日期] 2025-04-30

[基金项目] 国家重点研发项目(2023YFC3806503);湖北省自然科学基金计划项目(2025AFB474)

[作者简介] 杨柳清(2000-),女(汉族),湖北省孝感市人,硕士研究生在读,主要从事医院感染管理研究。

[通信作者] 李节 E-mail: Lijie@hust.edu.cn

高不下^[2]。

空气传播是呼吸道病原体扩散的关键途径,在流行性感冒(流感)、严重急性呼吸道综合征(SARS)、新型冠状病毒感染(COVID-19)及肺结核等呼吸道疾病的传播中发挥核心角色。患者在呼吸、咳嗽或打喷嚏时释放的病原体,以“感染性呼吸道颗粒”形式随空气流动,在室内扩散稀释,形成传播链,从而扩大感染范围。这类疾病传播速度快,影响范围广,常造成医疗系统过载和公共卫生资源紧张。以 2003 年暴发的 SARS 为例,该疫情给全球经济带来了约 600 亿美元的巨大损失,并严重损害了公众健康^[3]。

近 80% 的呼吸道感染病例发生在室内环境中^[4],在通风不良的室内场所,病毒传播的风险会显著增加。特别是在医疗建筑中,因人员流动频繁,极易引发严重的医院感染,直接威胁医院内人员的生命安全。因此,明确感染性呼吸道颗粒动态传播过程,分析影响其扩散的关键行为因素,对遏制医院交叉感染、降低医疗建筑内人员的感染风险具有重要意义。

近年来,国内外研究主要聚焦于感染性呼吸道颗粒的释放行为。交谈、打喷嚏、咳嗽、呼吸等均为重要释放源。此外,研究^[5-9]表明,医院内人员的肢体动作(如开关门、人员移动等)也会影响颗粒的扩散。例如,病例报告^[10]显示,隔离病房开门可导致病房内空气外溢,引发水痘二次感染;人员移动也可能将颗粒物携带至相邻区域^[11];静坐患者周围颗粒

浓度会因行人经过而出现短暂波动。这些现象表明,医疗场所内人员肢体行为极有可能促进感染性呼吸道颗粒跨空间传播,增加医院感染风险。然而,相关研究尚不足,亟需深入探究肢体动作对感染性呼吸道颗粒传输的影响机制,以制定防控策略,遏制公共卫生事件扩散。

本文系统梳理了目前医疗建筑中人员肢体行为影响感染性呼吸道颗粒扩散的相关研究现状,分析了现有研究面临的主要难题与未来发展方向,为强化医院感染防控体系奠定了坚实的基础。

1 感染性呼吸道颗粒

1.1 感染性呼吸道颗粒概念 感染性呼吸道颗粒是感染者在疾病感染阶段所产生的特殊物质,由病原体、水分及呼吸道分泌物共同构成^[12]。这些颗粒主要通过感染者呼吸、言语交流、歌唱、吐痰、咳嗽或打喷嚏等行为,经由口腔和/或鼻腔排出体外,并随呼出气流扩散至周围环境。既往研究^[13-16]常使用气溶胶、颗粒物、污染物及飞沫等术语来表述此类颗粒,并探讨其扩散的空气动力学特征。长期以来,学界对“气溶胶”与“飞沫”的界定标准存在显著分歧。为统一学术表述,世界卫生组织(WHO)^[17]于 2024 年正式将承载病原体的呼吸道颗粒规范命名为“感染性呼吸道颗粒”,见图 1。本文基于这一国际共识,在后续论述中统一采用该标准术语,并简称“颗粒物”。

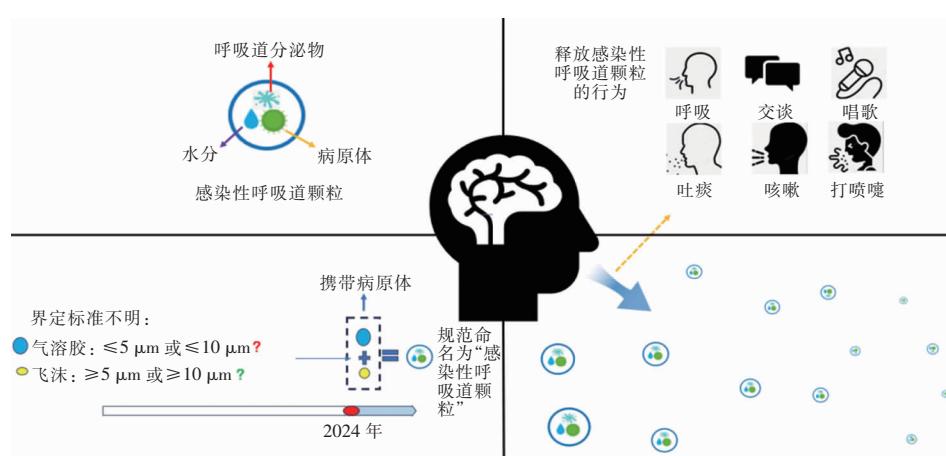


图 1 感染性呼吸道颗粒来源及组成

1.2 感染性呼吸道颗粒的扩散特性

感染性呼吸道颗粒的扩散特性主要受其物理特性(如粒径、密度)

以及环境因素(如气流、湿度、温度)的双重影响^[18-19]。这些颗粒通过咳嗽、打喷嚏、说话等呼吸道活动释放

到空气中,其扩散规律与粒径密切相关^[20]。具体而言,粒径较大的颗粒物因重力作用在近距离内沉降,而粒径较小的颗粒物可在空气中悬浮较长时间,并随气流传播更远距离,尤其在通风条件不良环境下,易造成颗粒物浓度累计,增加感染风险^[21]。这种粒径差异不仅决定了颗粒物的传播距离,还影响其在人体呼吸道中的沉积位置:粒径较小的颗粒物主要沉积在上呼吸道区域(如鼻腔和咽喉部),而粒径更小的颗粒物则能深入肺部,甚至到达肺泡组织,从而增加感染风险^[22]。此外,环境条件对感染性颗粒的传播同样具有重要影响。在湿度较高或温度较低的环境中,颗粒表面水分的蒸发速率降低,使病原体在颗粒中的存活时间延长,从而提高传播概率^[23]。气流的速度和方向也是决定颗粒扩散范围和路径的关键因素。在密闭空间内,气流运动能迅速将颗粒物扩散至整个房间,进一步提高感染风险^[24]。

同时,人员移动对颗粒物扩散的影响机制复杂,涉及气流扰动和颗粒物再悬浮。作为室内环境的重要扰动源,人员移动不仅改变气流分布,还会促使沉积颗粒物再悬浮,影响其空间分布特征。研究表明,人员移动显著改变颗粒物的再悬浮速率、悬浮时间、垂直分布及扩散范围等,为揭示其促进感染性呼吸道颗粒扩散的机制提供了依据。在医疗建筑等人员密集环境中,高频人员移动能干扰颗粒物悬浮状态:从流体力学上,颗粒物悬浮指其在空气中保持非沉降的稳定漂浮状态,而再悬浮则是指沉积颗粒因外力作用重新进入空气的过程。该过程取决于再悬浮力、重力及表面黏附力的动态平衡:当再悬浮力超过重力与黏附力之和时,颗粒会发生滑动或旋转,最终实现再悬浮^[27],加剧呼吸道感染风险。此外,人员移动诱导的气流变化还会延长颗粒物悬浮时间^[28-29]。因此,探究医院内人员移动对颗粒物悬浮的影响,对优化感染防控策略至关重要。

以往研究^[30-31]大多聚焦于开关门行为引发的病房内外空气交换,以此分析其对感染性呼吸道颗粒扩散的潜在影响。具体而言,频繁开关病房门会加剧室内空气流动,加速悬浮颗粒物扩散。这些颗粒物不仅可通过门缝渗入相邻空间,还可能随气流扩散到其他区域,从而增加病毒扩散风险^[32]。尤其是在负压隔离病房中,开门瞬间会导致病房内负压状态暂时失效,如同关键的“阀门”暂时失效,可能导致负压病房内颗粒物的外泄^[10],进而威胁医院内人员的健康。在手术环境中,频繁开关门则会破坏手术室的正压环境。美国约翰霍普金斯医院对近 200 台

下肢关节置换手术进行分析显示,手术期间频繁开关门可能破坏手术室的层流正压系统,导致外部未过滤空气侵入无菌环境,从而增加术中感染发病率^[33]。因此,探究开关门对医疗建筑内颗粒物扩散的影响,对医院感染防控工作尤为重要。

2 感染性呼吸道颗粒与医疗建筑中人员肢体行为的关系

目前,关于医疗建筑内感染性呼吸道颗粒扩散特性的研究多聚焦于静态环境分析,如通过优化病房通风设计以降低室内颗粒物浓度^[34-35]。然而,医疗环境中感染性呼吸道颗粒的传播与人员行为模式密切相关。现阶段研究热点在于解析咳嗽、打喷嚏、交谈及呼吸等行为产生的颗粒特性,包括粒径分布、浓度变化规律及空间扩散范围,并据此评估其对周围人群的潜在感染风险。但需注意的是,医疗建筑环境中人员肢体活动对颗粒物扩散的动态调控机制尚未得到系统解析,该领域仍亟待通过多学科协同研究,深入揭示其内在作用规律,以构建完善的理论模型填补现有认知空白。

2.1 医疗建筑内人员常见的肢体行为 在医疗建筑这一特定环境中,人员肢体行为是指医院内人员表现出的可直接观测的身体动作。此类行为通常遵循医院日常运作规范,呈现为常规行为模式,其中开关门、人员移动等高频活动尤为典型。在医疗建筑中,开关门及人员移动作为高频次肢体活动,会引发室内气流场变化,促使颗粒物突破局部区域限制,通过空气流动扩散至其他空间,从而增加医院感染风险。鉴于此,本研究系统性整合开关门及人员移动这两种典型肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散的影响,以期为医疗环境感染防控提供科学依据。

2.1.1 人员移动 医院日常环境中,医护人员穿梭于病房与手术室之间,患者及其家属则在诊疗区域、检查室、药房及住院部之间频繁往来,人员移动构成了医院运作的关键环节。目前研究^[36]表明,人员移动是导致室内环境中颗粒物浓度升高的主要因素。具体而言,人员移动产生的尾流提高颗粒物的传播效率,并扩大其传播范围,见图 2^[37]。Choi 等^[38]在无通风走廊环境中研究了人员移动对颗粒物扩散的影响。试验发现,行走产生的尾流可有效携带颗粒物,将其扩散至距源头 8 m 处;同时,前行过程中身体运动会裹挟前方颗粒物向前迁移,进一步扩大扩散范围。

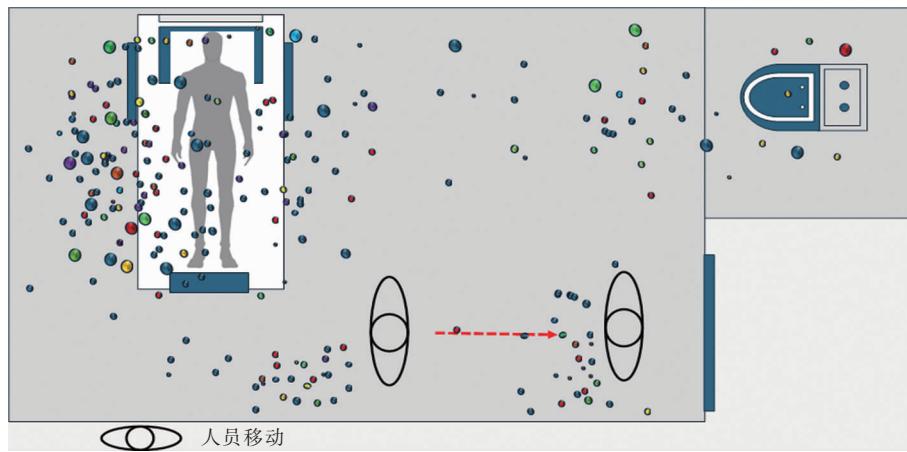


图 2 人员移动对感染性呼吸道颗粒跨空间传播的影响

关于人员移动对颗粒物扩散影响的诸多研究中,移动速度一直是核心关注点。人员移动速度显著影响空气中颗粒物的衰减过程:Cao 等^[29]研究揭示,在有人活动的房间内,颗粒物的浓度衰减速度比无人活动时明显减慢。具体而言,人员移动速度越快,颗粒物的衰减过程越缓慢。以将空气中颗粒浓度降低至初始值的 10% 为例,在静止不动(速度 0 m/s)、缓慢移动(速度 0.1 m/s)以及较快移动(速度 0.2 m/s)三种情况下,所需的时间分别为 12.5、13、14 min。Wang 等^[39]研究表明,提高步行速度可减少空气中悬浮微粒的再悬浮和扩散,从而降低感染性呼吸道颗粒的传播风险。其在负压隔离病房的研究发现,当步行速度从 0.25 m/s 增加到 1.0 m/s 时,悬浮微粒总数在 5 s 内可以减少高达 98%。此外,Wang 等^[39]研究还表明,人员移动不仅影响悬浮微粒数量,还可增加沉积量,进一步降低了空气中感染性呼吸道颗粒的传播风险。与静止状态相比,行走模式(速度 0.25~1.0 m/s)能够增加飞沫的沉积量。这是因为大多数飞沫沉积在患者头部上方的垂直后墙上,而行走引起的加速气流使更多飞沫在该区域沉积。增加移动速度可能会减缓颗粒物的外溢。Choi 等^[40]利用大涡模拟(LES)技术研究人类行走引起的颗粒物扩散现象,发现较快的步行速度会减少颗粒物在房间之间的传输。例如,在模拟的 5 人连续行走事件中,当步行速度为 1.25 m/s(较快速度)时,每人从污染房间传输到清洁房间的颗粒物质量平均仅 5.4 cf,相较于较低步行速度下的传输量,这一数值显著降低。

人员移动方向对感染性呼吸道颗粒的扩散具有重要影响。Eslami 等^[41]利用计算流体动力学(CFD)模拟研究了医护人员在病床区域往返移动时

颗粒物的扩散规律。当移动人员向前移动时,颗粒物主要局部分布在其身后区域,当医护人员以 0.25 m/s 的速度向前移动时,其身后区域的颗粒物浓度超过 10 CFU/m³,而其他区域的浓度相对较低。而当移动人员返回至起始位置时,其移动及转弯动作会导致身后的颗粒物扩散至移动人员的呼吸区域,从而增加感染风险。同时,位于移动路径后方的人员因尾流效应会暴露于更高浓度的颗粒物中,其感染风险也随之升高,当医护人员与患者之间的距离<440 mm 时,患者呼吸区域内的颗粒物浓度可能超过 10 CFU/m³。人体不同部位的活动对空气中感染性呼吸道颗粒的分布与扩散具有显著影响,Tao 等^[42]运用 CFD 对以恒定速度行走的人体模型进行仿真,发现前进过程中,上半身产生的气流往往呈上升趋势并向后移动,这会导致人体呼吸区域的颗粒物浓度增加。此外,尽管下肢运动会产生侧向气流,但其对诱导地面沉积颗粒物重新悬浮的影响较大。人体模型停止运动后,向后移动的气流会变成向上流过头部的气流。此外,手臂活动也会对呼吸区域内颗粒物的扩散有显著影响^[43]。

人员移动数量通过影响气流变化进而影响感染性呼吸道颗粒扩散。Sunagawa 等^[44]研究量化了手术室内人员移动对颗粒物再悬浮的影响,发现多人行走会显著增加悬浮颗粒物浓度并扩大其扩散范围,特别是 0.3~1 μm 粒径范围的颗粒更易被携带至无菌区域,与 Wu 等^[28]的研究相符,即多人移动加剧区域间的空气对流,从而增强颗粒物的横向传播能力。值得注意的是,不仅小粒径颗粒物容易被携带和扩散,粒径 20~50 μm 的颗粒物也会因多人活动引起的气流变动被带到 3 m 以外的距离。

目前,研究人员已认识到人员移动对颗粒物分

布具有不可忽视的重要影响。近年来,国内外医疗建筑领域在人员移动如何影响感染性呼吸道颗粒方面的研究已经积累了丰富成果,但仍面临着诸多亟待解决的问题和挑战。关于移动路径是否会影响医疗建筑内颗粒物的再悬浮率及浓度,目前鲜有文献报道。在此基础上,可以进一步对比分析不同移动路径下颗粒物的再悬浮及沉积扩散情况,以揭示其内在规律和机制。此外,人员移动可通过改变周围气流对病原体颗粒物的传播扩散产生重要影响,但目前尚无研究能够量化人员移动、气流变化与颗粒扩散物三者间的具体关系。因此,未来的研究应致力于通过数据建模和试验验证,量化人员移动、气流变化以及颗粒物扩散之间的相互作用关系,特

别是明确气流的中介作用,从而为有效防控病原微生物的传播提供更科学的依据和策略。

2.1.2 开关门行为 门体启闭动作会显著改变室内外气流动力学平衡。开门瞬间会迅速扰动门口气流,进而诱发高速旋转的湍流涡旋^[30],这种流体力学效应可能促进室内外病原体颗粒的交换与扩散,见图3。通常情况下,患有呼吸道传染病的患者会被安排在负压隔离病房内,通过定向气流组织实现感染性呼吸道颗粒的单向排出。但人员执行开关门操作时会破坏压差梯度,严重时甚至导致压力逆转现象,使原本受控的隔离环境失效,削弱隔离病房的防护功能。

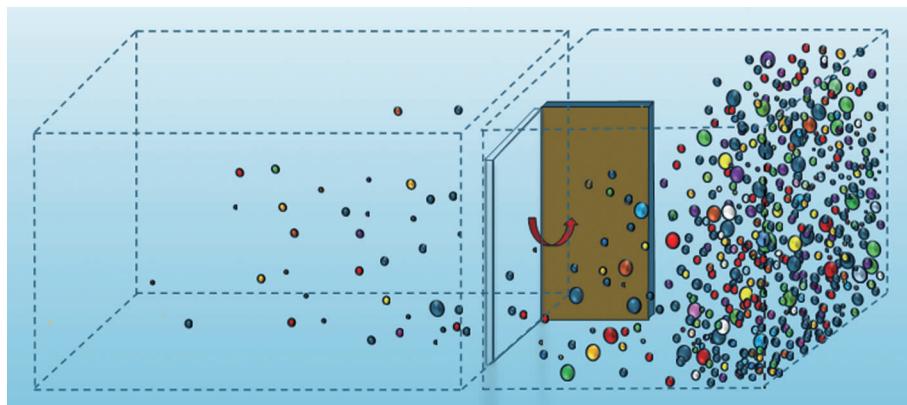


图3 开关门行为对感染性呼吸道颗粒扩散的影响

开关门行为会引发门附近区域的气流改变,如开门的角度会影响气流的流向,进而影响颗粒物的扩散;开门时,空气交换可能导致颗粒物的传播^[45]。相比全开门状态,半开门能有效阻止空气从病房溢出至护士站,从而减少颗粒物扩散^[46]。此外,Bhattacharya 等^[47]研究了手术室中完全打开门时室内颗粒物浓度的变化,发现其数量比预期高出 69.3%。

在开关门过程中,病房内外感染性呼吸道颗粒物的泄漏量存在显著差异。王天赐^[8]采用 CFD 数值模拟方法,系统研究了隔离病房门体开关动作的空气动力学特征,并分析了开门与关门动作对感染性呼吸道颗粒扩散的不同影响。关门操作导致的空气泄露量约为开门过程的 2 倍以上,且其泄露速率更快,这表明开门与关门这二者对感染性呼吸道颗粒扩散的影响存在本质性差异。

首先,门类型的选择直接影响空气交换效率及颗粒物扩散特性。铰链门特有的摆动运动会产生显著的抽吸效应,这使其与滑门等其它类型的门存在

本质差异,其中双铰链门引发的颗粒物外溢风险最为显著。为评估铰链门与滑动门在开启时对隔离病房内颗粒物扩散的影响,并分析医护人员通行时的气流扰动对颗粒物外溢的风险,Tang 等^[48]采用定性的方法,设计了一个 1:10 比例的水槽模型,通过雷诺数等效原理将水中的流体动力学行为等效于空气中的真实场景,使用蓝色食用染料为示踪剂,通过观测水流运动模拟感染性呼吸道颗粒的扩散过程。结果表明,双铰链门引发的颗粒物外溢风险最为显著,其次依次为单铰链门、双滑门和单滑门,且铰链门开启时诱导的空气流动量大于滑门,尤其是快速开启时。该研究结果与 San 等^[49]的研究发现互证。San 等^[49]通过量化分析不同门体构造的空气渗入与外溢量,揭示了门体类型选择对感染性呼吸道颗粒扩散的影响。在相同通风配置下,采用滑动门设计的手术室相比传统铰链门结构,展现出显著的空气屏障优势,外部携颗粒物的空气渗入量可减少 32%~47%。如在湍流通风系统中,滑动门手术室

仅允许 0.119 m^3 的外部空气进入,而铰链门手术室的渗入量高达 1.165 m^3 ,是前者的十倍以上。相应地,滑动门手术室的空气排出量为 1.835 m^3 ,铰链门系统则达到 3.800 m^3 ,进一步印证了滑动门在维持室内气压稳定方面的优越性。层流系统中差异同样显著,滑动门将外部空气进入量控制在 0.130 m^3 ,而铰链门手术室达到 0.932 m^3 ,后者是前者的七倍以上。空气排出量方面,滑动门系统为 1.687 m^3 ,铰链门系统则骤增至 5.191 m^3 。该研究通过比较不同门体产生的空气外溢量,说明门体设计对感染性颗粒扩散效果存在显著差异。

其次,开门持续时间也会影响感染性呼吸道颗粒的外溢和扩散。Chang 等^[50]研究发现,颗粒物外溢量与开门时间直接相关。同样地,Taaffe 等^[51]通过观察和采样对 4 个骨科手术进行分析,记录门开启和工作人员流动情况,并模拟 30 min 的操作室功能试验。结果显示,手术室内颗粒物浓度受开门持续时间的影响,相较于 6 s 的较短开门时间,12 s 的较长开门时间会使室内颗粒物负荷升高。此外,Mousavi 等^[52]采用数值模拟法研究医院隔离病房门运动时间与颗粒物交换的关系,结果表明,在 7 s 的门循环间隔内,约有 5% 的 $1.0 \mu\text{m}$ 颗粒物从前室迁移至隔离室,而在 3 s 或 5 s 的门循环间隔内,则未观察到颗粒物进入隔离室。

此外,开门频率也是影响感染性呼吸道颗粒扩散的关键因素。增加开门次数会提升室内颗粒物浓度。Sadrizadeh 等^[53]研究表明,每 150 s 的门体启闭操作会使手术室微生物浓度平均升高 $7 \text{ CFU}/\text{m}^3$; Rezapoor 等^[54]使用粒子计数器计算关节置换术空手术室中空气中颗粒数量,发现开门频率与空气颗粒物浓度呈正相关关系。关闭层流气流通风系统时,门每开启一次,颗粒物密度增加 $117.8 \text{ particles}/\text{ft}^3$ 。开启层流气流通风系统时,门每开启一次,颗粒物密度增加 $1.9 \text{ particles}/\text{ft}^3$ 。Scaltriti 等^[55]使用被动和主动采样方法收集空气中颗粒物计数,结果表明开门频率是颗粒物数量增加的正向预测因子,频繁开门会增加手术部位感染概率。

目前,对于开关门行为导致病房内外感染性呼吸道颗粒扩散的认知尚未形成统一结论。研究者普遍认为,开关门对负压隔离病房气压的影响,以及开关门过程中的气流变化,是引发颗粒物扩散的关键因素。然而,开关门速度、空气流速与开关门时颗粒物扩散浓度之间具体的量化关系,仍有待进一步研究。

3 结论

综上所述,国内外关于医院工作人员肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散影响的研究,主要集中在人员肢体行为对气流和周围环境的作用效应。感染性呼吸道颗粒的跨空间传播与开关门的速度、持续时间及门的类型等因素密切相关。其扩散也与人员的移动速度等变量紧密相连。目前针对人员肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散的真实场景试验研究相对匮乏,且缺乏相应的量化模型构建。深入探究医院内人员肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散的影响,对于优化医护人员的操作流程、完善医疗建筑的“平时与应急结合”设计理念,以及加速改进我国乃至全球的感染防控管理体系,均具有深远意义。

作者贡献声明:杨柳清负责选题、论文撰写,董子妍、谢雯、张悦负责论文语言润色,杨彩青、周迎、郑琪负责审稿与反馈,李节负责研究指导与论文审阅。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

[参考文献]

- [1] Tuite AR, Bhatia D, Moineddin R, et al. Global trends in air travel: implications for connectivity and resilience to infectious disease threats[J]. J Travel Med, 2020, 27(4): taaa070.
- [2] Bhadoria P, Gupta G, Agarwal A. Viral pandemics in the past two decades: an overview[J]. J Family Med Prim Care, 2021, 10(8): 2745–2750.
- [3] 世界卫生组织. 突发卫生事件是全球经济与安全的最大风险之一[EB/OL]. (2017-07-08)[2024-12-10]. <https://www.who.int/zh/news-room/speeches/item/health-emergencies-represent-some-of-the-greatest-risks-to-the-global-economy-and-security>. WHO. Health emergencies represent some of the greatest risks to the global economy and security[EB/OL]. (2017-07-08)[2024-12-10]. <https://www.who.int/zh/news-room/speeches/item/health-emergencies-represent-some-of-the-greatest-risks-to-the-global-economy-and-security>.
- [4] Qian H, Miao T, Liu L, et al. Indoor transmission of SARS-CoV-2[J]. Indoor Air, 2021, 31(3): 639–645.
- [5] 张金航, 张登春, 熊梨. 医护人员走动对 ICU 病房内气流分布的影响[J]. 制冷与空调, 2023, 37(1): 45–51, 59. Zhang JH, Zhang DC, Xiong L. Effect of medical staff walking on air flow characteristics in ICU ward[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2023, 37(1): 45–51, 59.
- [6] Brohus H, Balling KD, Jeppesen D. Influence of movements

- on contaminant transport in an operating room[J]. Indoor Air, 2006, 16(5): 356–372.
- [7] Hang J, Li YG, Jin RQ. The influence of human walking on the flow and airborne transmission in a six-bed isolation room; tracer gas simulation[J]. Build Environ, 2014, 77: 119–134.
- [8] 王天赐. 隔离病房生物气溶胶分布特征及开关门过程泄露风险研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2022.
- Wang TC. Research on distribution characteristics of bioaerosol and leakage risk during door opening and closing in isolation wards[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.
- [9] Hang J, Li YG, Ching WH, et al. Potential airborne transmission between two isolation cubicles through a shared anteroom[J]. Build Environ, 2015, 89: 264–278.
- [10] Tang JW, Eames I, Li Y, et al. Door-opening motion can potentially lead to a transient breakdown in negative-pressure isolation conditions: the importance of vorticity and buoyancy airflows[J]. J Hosp Infect, 2005, 61(4): 283–286.
- [11] Wu JL, Weng WG, Shen LC, et al. Transient and continuous effects of indoor human movement on nanoparticle concentrations in a sitting person's breathing zone[J]. Sci Total Environ, 2022, 805: 149970.
- [12] 中国医院协会临床微生物实验室专业委员会. 新发突发呼吸道传染病病原微生物分级检测专家共识(2024)[J]. 协和医学杂志, 2025, 16(1): 109–124.
- Chinese Hospital Association Clinical Microbiology Laboratory Specialized Committee. Expert consensus on tiered detection of newly emerging and outbreak respiratory infectious pathogens (2024)[J]. Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital, 2025, 16(1): 109–124.
- [13] 冯国会, 蔡易霖, 张亿先, 等. 飞沫气溶胶污染源特性研究现状[J]. 暖通空调, 2018, 48(7): 22–30.
- Feng GH, Cai YL, Zhang YX, et al. Research situation of characteristics of aerosol droplet pollution sources[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018, 48(7): 22–30.
- [14] 赵歆治. 室内生物颗粒物运动和传播的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- Zhao XZ. Experimental research on movement and transport of indoor bio-particles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [15] 赵越. 气流组织对负压隔离病房污染物扩散的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- Zhao Y. Research on the influence of air distribution on pollution diffusion in negative pressure isolation room[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [16] 代慧, 赵彬. 人呼出飞沫和飞沫核的运动传播规律[J]. 科学通报, 2021, 66(4): 493–500.
- Dai H, Zhao B. Movement and transmission of human exhaled droplets/droplet nuclei[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(4): 493–500.
- [17] 世界卫生组织. 主要卫生机构概述通过空气传播的病原体的最新术语[EB/OL]. (2024–04–18)[2025–04–27]. <https://www.who.int/zh/news/item/18-04-2024-leading-health-agencies-outline-updated-terminology-for-pathogens-that-transmit-through-the-air>.
- WHO. Leading health agencies outline updated terminology for pathogens that transmit through the air[EB/OL]. (2024–04–18)[2025–04–27]. <https://www.who.int/zh/news/item/18-04-2024-leading-health-agencies-outline-updated-terminology-for-pathogens-that-transmit-through-the-air>.
- [18] Wei JJ, Li YG. Airborne spread of infectious agents in the indoor environment[J]. Am J Infect Control, 2016, 44(Suppl 9): S102–S108.
- [19] 朱媛园, 黄英, 彭世富, 等. 医院呼吸道致病微生物的传播与防控[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(12): 875–881.
- Zhu YY, Huang Y, Peng SF, et al. Transmission and control of respiratory pathogenic microorganisms in hospital[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(12): 875–881.
- [20] 魏方, 周娅, 周军, 等. 咳嗽飞沫核携带病毒在病房机械通风条件下经空气传播的人工模拟技术研究[J]. 中国感染控制杂志, 2020, 19(9): 765–772.
- Wei F, Zhou Y, Zhou J, et al. Artificial simulation research on cough induced virus droplet nuclei transmission in air in mechanically ventilated hospital ward[J]. Chinese Journal of Infection Control, 2020, 19(9): 765–772.
- [21] 张萌, 刘馨, 孙鹏, 等. 室内气溶胶颗粒物运动和传播的研究现状[J]. 建设科技, 2022(9): 40–45.
- Zhang M, Liu X, Sun P, et al. Research status of indoor aerosol particles movement and propagation[J]. Construction Science and Technology, 2022(9): 40–45.
- [22] Tellier R, Li YG, Cowling BJ, et al. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary[J]. BMC Infect Dis, 2019, 19(1): 101.
- [23] Zarei M, Rahimi K, Hassanzadeh K, et al. from the environment to the cells: an overview on pivotal factors which affect spreading and infection in COVID-19 pandemic[J]. Environ Res, 2021, 201: 111555.
- [24] Liu ZJ, Zhu HY, Song YF, et al. Quantitative distribution of human exhaled particles in a ventilation room[J]. Build Simul, 2022, 15(5): 859–870.
- [25] Wu JL, Weng WG, Fu M, et al. Numerical study of transient indoor airflow and virus-laden droplet dispersion: impact of interactive human movement[J]. Sci Total Environ, 2023, 869: 161750.
- [26] Feng L, Zeng FX, Li RB, et al. Influence of manikin movement on temperature stratification in a displacement ventilated room[J]. Energy Build, 2021, 234: 110700.
- [27] Wang HC. Effects of inceptive motion on particle detachment from surfaces[J]. Aerosol Sci Technol, 1990, 13(3): 386–393.
- [28] Wu JL, Geng J, Fu M, et al. Multi-person movement-induced airflow and the effects on virus-laden exhalation droplet dispersion in indoor environments[J]. Indoor Air, 2022, 32(9): e13119.
- [29] Cao SJ, Cen DD, Zhang WR, et al. Study on the impacts of

- human walking on indoor particles dispersion using momentum theory method[J]. *Build Environ*, 2017, 126: 195–206.
- [30] Kalliomäki P, Saarinen P, Tang JW, et al. Airflow patterns through single hinged and sliding doors in hospital isolation rooms – effect of ventilation, flow differential and passage[J]. *Build Environ*, 2016, 107: 154–168.
- [31] Villafruela JM, San José JF, Castro F, et al. Airflow patterns through a sliding door during opening and foot traffic in operating rooms[J]. *Build Environ*, 2016, 109: 190–198.
- [32] Geisinger ML, Iaonnidou E. Up in the air? Future research strategies to assess aerosols in dentistry[J]. *JDR Clin Trans Res*, 2021, 6(2): 128–131.
- [33] Mears SC, Blanding R, Belkoff SM. Door opening affects operating room pressure during joint arthroplasty[J]. *Orthopedics*, 2015, 38(11): e991–e994.
- [34] Lu YL, Oladokun M, Lin Z. Reducing the exposure risk in hospital wards by applying stratum ventilation system[J]. *Build Environ*, 2020, 183: 107204.
- [35] Cho J. Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: effect of supply and exhaust air diffuser configurations[J]. *Appl Therm Eng*, 2019, 148: 208–218.
- [36] Poussou SB, Mazumdar S, Plesniak MW, et al. Flow and contaminant transport in an airliner cabin induced by a moving body: model experiments and CFD predictions[J]. *Atmos Environ*, 2010, 44(24): 2830–2839.
- [37] Li ZK, Ma XQ, Liao YF. Airflow and aerosol transport in the hospital isolation zone based on dynamic scenarios[J]. *Build Environ*, 2024, 265: 111970.
- [38] Choi JI, Edwards JR. Large eddy simulation and zonal modeling of human-induced contaminant transport[J]. *Indoor Air*, 2008, 18(3): 233–249.
- [39] Wang JL, Chow TT. Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room[J]. *Build Environ*, 2011, 46(10): 1993–2002.
- [40] Choi JI, Edwards JR. Large-eddy simulation of human-induced contaminant transport in room compartments[J]. *Indoor Air*, 2012, 22(1): 77–87.
- [41] Eslami J, Abbassi A, Saidi MH. Numerical simulation of the effect of visitor's movement on bacteria-carrying particles distribution in hospital isolation room[J]. *Sci Iran B*, 2017, 24(3): 1160–1170.
- [42] Tao Y, Inthavong K, Tu JY. Computational fluid dynamics study of human-induced wake and particle dispersion in indoor environment[J]. *Indoor Built Environ*, 2017, 26(2): 185–198.
- [43] Ai ZT, Melikov AK. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review[J]. *Indoor Air*, 2018, 28(4): 500–524.
- [44] Sunagawa S, Koseki H, Noguchi C, et al. Airborne particle dispersion around the feet of surgical staff while walking in and out of a bio-clean operating theatre[J]. *J Hosp Infect*, 2020, 106(2): 318–324.
- [45] Smith EB, Raphael IJ, Maltenfort MG, et al. The effect of laminar air flow and door openings on operating room contamination[J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(9): 1482–1485.
- [46] Tsang TW, Wong LT, Mui KW, et al. Preparing for the next pandemic: minimizing airborne transmission in general inpatient wards through management practices[J]. *Energy Build*, 2023, 294: 113214.
- [47] Bhattacharya A, Ghahramani A, Mousavi E. The effect of door opening on air-mixing in a positively pressurized room: Implications for operating room air management during the COVID outbreak[J]. *J Build Eng*, 2021, 44: 102900.
- [48] Tang JW, Nicolle A, Pantelic J, et al. Different types of door-opening motions as contributing factors to containment failures in hospital isolation rooms[J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e66663.
- [49] San José Alonso JF, Sanz-Tejedor MA, Arroyo Y, et al. Analysis and assessment of factors affecting air inflow from areas adjacent to operating rooms due to door opening and closing[J]. *J Build Eng*, 2022, 49: 104109.
- [50] Chang L, Zhang X, Wang SJ, et al. Control room contaminant inleakage produced by door opening and closing: dynamic simulation and experiments[J]. *Build Environ*, 2016, 98: 11–20.
- [51] Taaffe KM, Allen RW, Fredendall LD, et al. Simulating the effects of operating room staff movement and door opening policies on microbial load[J]. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 2021, 42(9): 1071–1075.
- [52] Mousavi ES, Grosskopf KR. Airflow patterns due to door motion and pressurization in hospital isolation rooms[J]. *Sci Technol Built Environ*, 2016, 22(4): 379–384.
- [53] Sadrizadeh S, Pantelic J, Sherman M, et al. Airborne particle dispersion to an operating room environment during sliding and hinged door opening[J]. *J Infect Public Health*, 2018, 11(5): 631–635.
- [54] Rezapoor M, Alvand A, Jacek E, et al. Operating room traffic increases aerosolized particles and compromises the air quality: A simulated study[J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33(3): 851–855.
- [55] Scaltriti S, Cencetti S, Rovesti S, et al. Risk factors for particulate and microbial contamination of air in operating theatres[J]. *J Hosp Infect*, 2007, 66(4): 320–326.

(本文编辑:陈玉华)

本文引用格式:杨柳清,董子妍,谢雯,等.医疗建筑内人员肢体行为对感染性呼吸道颗粒扩散的影响研究进展[J].中国感染控制杂志,2025,24(12):1854–1861. DOI:10.12138/j.issn.1671-9638.20252465.

Cite this article as: YANG Liuqing, DONG Ziyan, XIE Wen, et al. Research progress on the influence of physical behavior of personnel in medical buildings on the spread of infectious respiratory particles[J]. Chin J Infect Control, 2025, 24(12): 1854–1861. DOI: 10.12138/j.issn.1671–9638.20252465.