

基于行为轨迹的中庭式酒店 COVID-19 感染概率研究

杨 梦¹, 庞 佳^{1,2}, 杨 柳^{1,2}, 王 杨¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 绿色建筑全国重点实验室(XAUAT), 陕西 西安 710055)

摘要: 中庭式酒店建筑因中庭空间人员密集、气流波动大, 属呼吸道传染疾病高感染概率区域, 建筑高大公共空间的传染概率有待研究。以某中庭式酒店为研究对象, 基于该酒店人流状况、行为轨迹的实测, 通过回归分析, 得到该酒店人流密度的分布规律; 运用 Anylogic 软件, 结合 Wells-Riley 感染概率计算模型, 对不同类型人员感染后的酒店人群感染概率进行模拟。通过模拟可知, 住宿人群、就餐人群、商务会议三类人群中单一人群感染时, 感染概率分别为 29.3%, 17.9%, 36.4%; 当三类人员及后勤人员共同耦合感染时, 感染概率增加至 42.6%。通过对污染物颗粒的时空分布规律的分析发现三层、标准层污染物颗粒较多; 人员交叉与感染概率呈正相关; 流线交叉较多的就餐空间、滞留时间较长休闲空间、竖向交通空间等应重点考虑设计措施以降低其感染概率; 该研究为人员行为轨迹下的酒店空间的布局优化提供研究思路, 为疫情背景下寒冷地区中庭式酒店平疫结合酒店空间布局设计研究提供理论依据。

关键词: 中庭公共空间; 行为轨迹; Wells-Riley 模型; 人流密度; 感染概率

中图分类号: TU247.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0623-10

Research on the probability of COVID-19 infection in atrium-style hotels based on behavioral trajectory

YANG Meng¹, PANG Jia^{1,2}, YANG Liu^{1,2}, WANG Yang¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: The atrium-style hotel building is an area with high probability of respiratory infectious diseases due to the dense population and large air flow fluctuation in the atrium space. The infection probability of the tall public space buildings needs to be studied. This study selects an atrium-style hotel as the research object, based on actual measurements of the hotel's pedestrian volume and behavioral trajectories. Through regression analysis, the distribution of the hotel's pedestrian density is obtained. Using Anylogic software and substituting the Wells-Riley infection probability calculation model, the infection probability of different types of hotel population was simulated. When a single group of the accommodation group, dining group, business meeting group is infected, the infection probability is 29.3%, 17.9%, 36.4% respectively. When all the three groups and logistical group are jointly infected, the infection probability increases to 42.6%. Through the temporal and spatial distribution of pollutant particles, it is found that there are more pollutant particles on the third layer and standard layer within the building. Personnel crossing is positively correlated with infection probability. Design measures should be considered to reduce the infection probability in dining spaces with more streamlines cross, leisure spaces with longer stays, vertical traffic spaces. The study provides a research approach for optimizing the layout of hotel spaces in the context of personnel behavior trajectories and offers a theoretical basis for designing atrium-style hotels in cold areas combined with anti-epidemic measures.

Key words: atrium public space; track of behavior; Wells-Riley model; pedestrian density; infection probability

全世界每年有大量的患者死于呼吸道传染疾病, 感染多集中爆发于公共空间, 而公共建筑人

流密集, 降低新冠病毒等呼吸道传染疾病在其中的感染风险具有重大意义^[1]; 酒店作为跨区域人

收稿日期: 2023-06-14

修回日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(52108029)

第一作者: 杨 梦(1999—), 女, 硕士生, 主要研究方向为绿色建筑设计研究。E-mail: yangmeng@xauat.edu.cn

通信作者: 庞 佳(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为酒店建筑节能设计研究。E-mail: pangjia@xauat.edu.cn

员密集交流场所,多个中高端酒店都曾作为疫情突发场所而进行紧急封闭隔离^[2],同时,中庭式酒店中庭空间气流波动大^[3],人员流线围绕中庭布置,灵活交叉。平疫结合酒店空间隔离改造要点首要考虑流线的交叉以及气流的波动^[4],中庭式酒店较常规酒店存在更大感染风险,因而对酒店空间布局与流线提出更高的要求^[5]。

呼吸道感染概率与病毒种类、暴露时间、宿主免疫能力等多因素有关,目前研究学者使用较多的传染风险预测模型是 Wells-Riley 模型^[6],公式表明感染风险由粒子浓度、人员密度、人员停留时间决定。其中,钱华教授^[7]结合 CFD 将 Wells-Riley 模型进一步拓展以预测室内气流组织对感染概率的影响。

基于感染概率模型,相关学者对不同空间场所的感染风险进行研究。在对公共交通感染风险研究中,YANG X、吴家麟等^[8-9]基于公交车中病毒颗粒的模拟提出感染风险的计算方法,该研究表明增加环境湿度、分散排风口、增大消杀频率等措施可有效降低车内感染风险。在对医疗场所感染风险研究中,张静等^[10]通过对医疗废物车间的通风方案对比模拟发现局部排风、竖壁贴附送风可有效增强清除效率,降低感染概率;黎家雄、钟志涛、刘刚等^[11-13]分别对于门诊和住院人员活动规律以及室内送风状况进行调研,模拟分析得到空间的感染概率,提出可通过控制人流密度、提高新风换气次数,优化送风方式降低感染概率;在对学校空间感染风险的研究中,Dong Y、陈红兵等^[14-15]对校园空间的自然通风下空间感染概率研究,合理的开窗尺寸以及混合通风方式可有效降低感染概率。在对影厅等公共场所感染风险研究中,Shao X、Liang C 等^[16-17]分别对于辩论场地、剧院大厅进行人员感染概率进行计算,发现充足新风和佩戴口罩,合理的送风方式可有效降低感染概率。以上对于感染概率的研究,主要通过研究单一密闭空间中的通气量以及气流组织,运用 Wells-Riley 模型进行感染概率的计算。

呼吸道疾病感染概率研究方法多采用环境通风实测模拟及仿真模型模拟来实现,其中,仿真模拟基于系统动力学理论,可以结合呼吸道传染病传播特点、人员行为,模拟微观场景中病毒感染状况,提出有效的改善措施。其中,陈国强等^[18]基于公交车上感染仿真模拟,发现公交车消毒间隔不超过 3 h,短途公交增加口罩佩戴比例,长途公交增加疫苗接种率及降低载客人数可以降

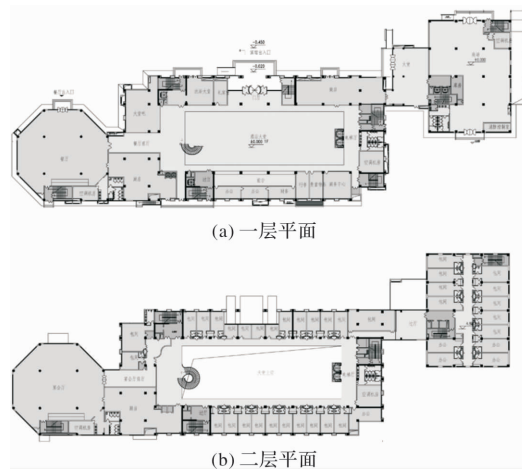
低感染概率;马剑、邓巧明等^[19-20]基于校园通勤人员时空伴随感染概率研究,表明分批错峰上下课、增加宿舍出入口数量、增加路径可降低感染概率,宿舍楼竖向分区管控可有效降低人流密度,提升防控效果;Sun、Harweg T 等^[21-22]基于智能体感染概率的模拟,表明合适的社交距离以及人员密度分别为 1.6~3 m、16 m²/人;Nasyrov 等^[23]通过对具体诊所传染性疾病预防进行仿真模拟,表明诊断室、治疗室等候人员会阻挡周围病人以增大感染概率,对功能空间布局调整、控制患者就诊时间可有效降低感染概率。

综上所述,相较通风模拟而言,物理仿真模型模拟可以反映人员活动对于感染概率的影响。现有对新冠病毒感染概率的研究主要集中在医疗空间、客运领域、校园建筑等场所,对酒店等公共人员密集场所感染风险的研究较少;此外,对感染概率的研究对象局限于单一空间,缺乏对人员轨迹交叉下多空间组合建筑感染概率的研究。

本文研究将基于酒店中不同人群的行为轨迹,运用软件模拟的方法,分析人员行为轨迹下,新冠病毒在酒店中传播的时空布局特点,进而提出酒店空间优化布局措施,为疫情背景下寒冷地区中庭式酒店平疫结合酒店空间布局设计研究提供参考依据。

1 研究对象

本文的研究对象为西安某豪华型酒店,疫情期间因突发疫情而紧急隔离使用。该酒店建筑面积为 41 619.5 m²,共计 9 层,有客房共计 195 间,分布于 4~9 层,均围绕中庭环绕布置。公共空间包括大堂、餐饮包间、西餐厅、西餐吧、会议室、客房等主要功能空间,四部电梯,具体位置及具体信息见图 1 和表 1。



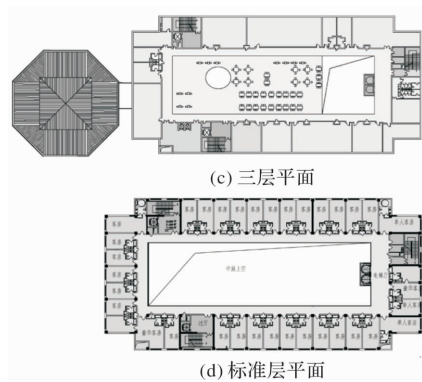


图 1 酒店平面布局

Fig. 1 The layout of the hotel

表 1 酒店功能及面积信息

Tab. 1 Hotel function and area information

编号	名称	数量	面积/m ²
1	酒店前台	1	1 760
2	西餐厅	1	260
4	大堂吧	1	-
5	包间	32	26
6	客房	195	33

酒店中的主要人员类型包括住宿人群、就餐人群、商务会议人群及后勤工作人员; 服务空间包括前台、大堂吧、餐饮包间、西餐厅、西餐吧, 客房, 具体空间组织如图 1 所示. 本研究将按照该酒店中功能空间布局进行物理模型设置, 运用仿真模型分析酒店空间中不同区域空间感染状况, 提出酒店空间布局优化的措施.

2 病毒扩散感染概率研究方法

2.1 人员感染概率计算模型

呼吸道传染疾病的传播途径包含飞沫传播、接触传播以及气溶胶传播, 因传染概率与多因素有关, 目前使用较多的是 Wells-Riley 模型, Wells 从概率学的角度提出 quanta 概念^[6]表明宿主体内引起感染所必需的最小剂量; 钱华等^[7]进行了深化运用. 该模型假设飞沫核均匀散布在整个封闭环境中, 飞沫核的浓度在整个感染时间内是稳定不变的, 不考虑飞沫和飞沫核的散布、病原体死亡率等的影响, 则感染概率为

$$P = \frac{C}{S} = 1 - e^{-\frac{I_0 p T}{Q}} \tag{1}$$

式中: P 为感染概率; C 为一次爆发中新产生的被感染人数; S 为总的易感人数; I 为感染人数; q 为一个患者呼出的病原体数量, quanta/h; p 为人员呼气量, m^3/h ; T 为暴露时间, h; Q 为房间的

通风量, m^3/h .

由公式可知, 易感人群通过气溶胶感染的风险与其吸入的病原体剂量有关, 易感人群吸入的病原体剂量与肺通气量、暴露时间和空气中病毒颗粒的浓度有关. 具体环境下, 易感人群吸入空气中病毒颗粒的 quanta 数值可定义为 N , Iq 即为在一定空间范围内释放的病毒数量, 则有某区域的病毒数目 N 为

$$N = Iq \tag{2}$$

则感染概率可以被简化为

$$P = 1 - e^{-\frac{N p T}{Q}} \tag{3}$$

式中: N_n 为人员所在位置的病毒粒子的数目, quanta; T_n 为人在该位置的停留时间, s; Q 为房间的通风量, m^3/h .

影响人员感染概率的变量为实时的感染颗粒 N , 接触时间 T 以及房间的通风量 Q . 在实时仿真模拟中, 对传染概率进行如下假设

$$P = 1 - e^{-\frac{p(N_1 T_1 + N_2 T_2 + \dots + N_n T_n)}{Q}} \tag{4}$$

在本研究中, 传染概率相关参数的设置, 对于患者呼出的病原体数量 q 取值为 48 quanta/h, 人员呼气量 p 取值为 $0.48 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[24-25]. 依据公式 (4), 进行实时随机感染概率的计算.

2.2 人员感染概率与人员密度之间的关系

人流密度是确定新风量需求的重要参数, 确定新风量的方法之一是按照规定性设计原则, 即依据人均新风量指标与人流流量乘积确定新风量, 即为

$$Q = P_F R_b S \tag{5}$$

式中: Q 为规范新风量, m^3/h ; P_F 为人员密度; 人/ m^2 ; R_b 为人均新风量指标, $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$; S 为单位面积, m^2 .

人均新风量指标确定下, 人员感染概率与人员密度之间的关系式为

$$P = 1 - e^{-\frac{I_0 p T}{P_F R_b S}} \tag{6}$$

不同功能空间的人均新风量指标下 (如表 2, 依据 JGJ/T 449—2018《民用建筑绿色性能计算标准》), 单位面积、单位小时下, 人员密度与人员感染概率之间的关系如图 2 所示. 酒店标准通风量下, 各空间的感染概率较高; 人员密度增大时, 对应的空间规范标准中的新风量增大, 感染概率降低. 同等人员密度下, 感染风险为休息厅 > 会议空间 > 大堂空间 > 客房空间 = 餐饮空间. 酒店空间中降低感染概率直接有效的途径是增大空间新风量.

表2 人均通风量及人员密度

Tab. 2 Per capita ventilation and personnel density

功能空间	人均通风量/ $\text{m}^3 \cdot (\text{h} \cdot \text{人})^{-1}$	人员密度/ $\text{人} \cdot \text{m}^{-2}$
大堂空间	20	0.02
廊道空间	-	0.02
餐饮空间	30	0.4
会议空间	14	0.4
客房空间	30	0.33
休息厅	10	0.1

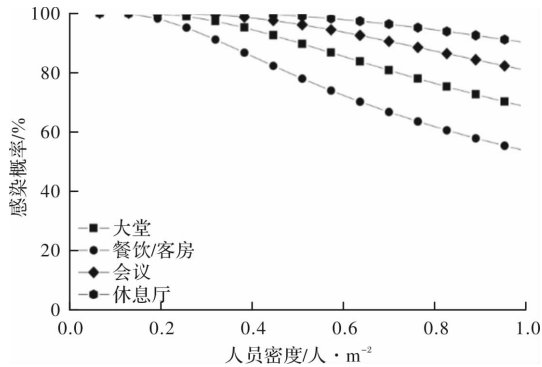


图2 人均通风量下感染概率与人员密度间关系

Fig. 2 Relationship between infection probability and population density under per capita ventilation

2.3 人员感染概率模型设置

2.3.1 感染机制设置

本研究以 Wells-Riley 人员感染概率计算核心,借用 Anylogic 中的行人库,通过具体人流参数与传染概率模型参数的设定,模拟不同类型人员在酒店中感染状况。

按照人员的健康状态将其划分为三类,分别为健康人员,潜伏人员和感染人员。感染人群会在空间释放传染物颗粒,健康人群因感染概率 P 随机感染转化为潜伏人员,潜伏人员不释放传染物颗粒,如图 3 所示。依据李瑞彬等^[24]综述研究可知污染物病毒颗粒的传播范围为 $0 \sim 2 \text{ m}$,即设定 2 m 为人员污染物颗粒传播半径。本研究中以矩形格子为单元,单元格中的污染物颗粒 N 以及人员在该单元格子中的停留时间 T 会实时影响人员的感染概率(如式 4),对健康人员进行随机的感染。

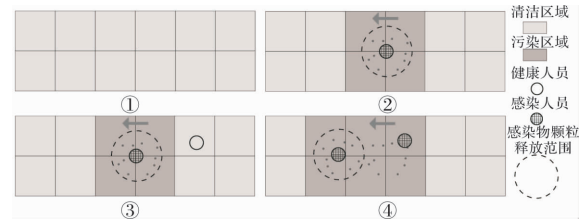


图3 感染机制

Fig. 3 Infection mechanism

2.3.2 构建模型并设置参数

根据酒店平面功能在 Anylogic 软件中进行物理建模,标记环境模型相关要素,包括墙体、出入口,餐饮包间、餐厅、客房、服务区等。其中,一层服务空间包括前台、大堂吧及电梯;二层服务空间包括包间与电梯;三层服务空间包括西餐厅、西餐吧、会议室与电梯;建筑客房简化成为标准层,标准层服务空间包括住宿房间及电梯,具体流线参数如表 3 所示。

表3 行为轨迹设置

Tab. 3 Track of behavior

流线类型	路径顺序	流线类型	路径顺序
住宿人员流线	入口—前台—电梯—四楼随机房间停留— 三楼餐厅—西餐吧—房间	后勤人员流线	后勤入口—工作室—前台服务 后勤入口—二楼打扫 后勤入口—三楼厨房—西餐厅 后勤入口—三楼打扫 后勤入口—四楼客房打扫
就餐人员流线	入口—大堂—西餐厅就餐—离开 入口—大堂—包间—离开		
商务会议流线	入口—会议室—自助餐厅—西餐吧—离开 入口—自助餐厅—西餐吧—离开		

酒店各空间的具体服务时间参数,基于 3.2 进行人群的日常活动时间的设定及简化,简化结果如表 4 所示。基于新冠病毒特性研究^[24-26],进行实验参数设置,如表 4 所示。

各模块参数停留参数的设置中,对于步伐速度以及人员的直径参考了王冰冰等人^[27]的研究,步伐速度设置为 1.1 m/s ,人员简化为圆形,半径取 0.5 m ,判断人员感染的时间频率及网格设置的比例会影响模拟的精度^[28],因整体模拟时间为 8 h , 5 s/次 的判断频率较为合适。

表4 实验参数设置

Tab. 4 Experimental parameter

功能空间	时间区间	设置	数量
前台服务时间/min	(1, 10)	病毒释放半径/m	2
大堂吧停留时间/min	(10, 120)	病毒释放速率 (quanta/h)	48
包间停留时间/min	(30, 120)		
西餐厅停留时间/min	(30, 120)	网格设置长度/m	2
西餐吧停留时间/min	(30, 120)	病毒存活时间/h	8
会议停留时间/min	(30, 120)	判断感染频率(s/次)	5

3 人员密度实测及回归分析

本研究于2022年11月13日对该酒店进行了人员流量调查,因酒店餐厅等重要公共空间停止营业时间为21:00,对酒店8:00~21:00人员进出状况进行统计,运用黑箱方法^[29-30]对于空间流量以及平均滞留时间进行计算与分析。

3.1 人流密度统计方法

(1)酒店总体人流量:统计时间为8:00~21:00,每隔0.5 h酒店建筑所有公共空间出入口统计一次进入和离开的人数。

(2)典型公共空间区域人员密度:统计时间为8:00~21:00,每隔0.5 h统计典型公共空间人员停留人数。

3.2 人流密度分析方法

设调研中的采样时间为 c ,采样总时间为 n ,采用时间段数 $m=n/c$,开始采样时间后的第 i 个时间段人数记为 a_i ,离开人数为 b_i ,若面积为 S ,则第 i 个时间段的人员密度 D_i 为

$$D_i = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^i (i=1,2,\dots, j=1,2,\dots) \quad (7)$$

人员滞留时间的计算公式如下。

$$t = \frac{P \times T}{W} \quad (8)$$

式中: t 为人员平均停留时间; P 为该区域平均滞留量; T 为采样总时间取13 h; W 为平均客流量。

针对本次调研,总采样时间为13 h,采样时间为0.5 h,总时间段数为26。酒店人员调研期间共进入588人,离开485人,酒店中滞留人数为103人,如图4(a)所示。

依据酒店人流量统计,进入酒店高峰时间段为11:00~14:00,16:00~18:00,共计占总人数的59.5%。人员多集中于酒店西餐厅、西餐吧、大堂吧等空间,大堂吧的停留人数平均值为2.7人,西餐吧的停留人数平均值为2.9人。

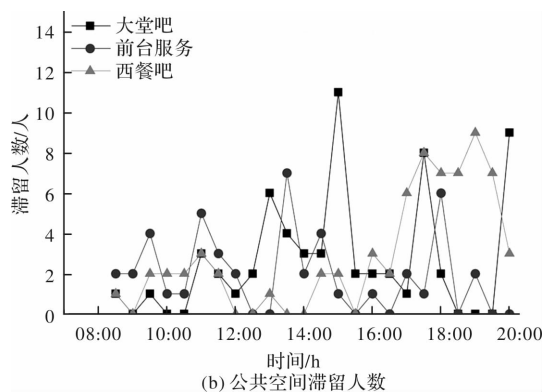
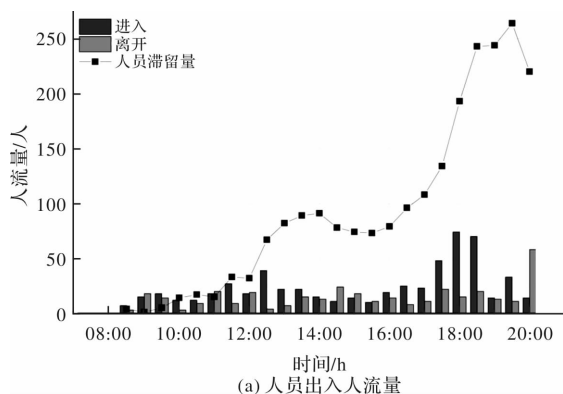


图4 人员流量统计

Fig. 4 Pedestrian flow statistics

对公共餐厅人流量分析可知,08:00~08:30,09:00~09:30为早餐期间人员进入高峰期,18:00~19:40为晚餐期间人员进入的高峰期,对于餐厅空间人流密度进行二阶多项式拟合,如公式(7)所示,得到酒店公共餐厅区域早晚的人员密度的回归为:

$$Y = -0.01t^2 + 0.18t - 0.73 \quad (9)$$

$$Y = -0.12t^2 + 4.5t - 42.94 \quad (10)$$

式中: t 为时间, h ; Y 为人流密度,人/ m^2 。

如图5所示,早餐人员的人流密度平均值为0.03人/ m^2 ,晚餐人员密度平均值为0.12人/ m^2 。酒店各公共空间服务时间由公式(8)计算知,人员在酒店空间的平均滞留时间为1.94 h,公共餐厅早餐平均滞留时间为0.47 h,晚餐时间平均滞留时间为0.55 h,大堂吧停留时间为0.34 h,经过统计记录可得前台服务时间为10~300 s。

基于酒店空间人流量及行为轨迹的调研,可知该酒店人员以就餐人群为主,酒店空间人员停留主要集中于就餐空间、休闲空间等公共空间,尤其是餐饮空间,人流量密度变化最为明显。酒店住宿流线上,前台服务频次高,人员由观光电梯进入客房;就餐流线中,人员通过电梯进入餐饮包间所在楼层;商务会议流线中,人员通过电梯进入会议及餐厅所在楼层;酒店的西餐厅及西餐吧、会议空间为酒店人员的密集进出场所。

综上,酒店空间中停留较长的空间分别为就餐空间、大堂吧台等休闲空间,人员流动性强的空间为各休闲空间,交通空间等,以上空间类型均为酒店中的易感空间,需重点加强该类型空间消杀以及空间通风。

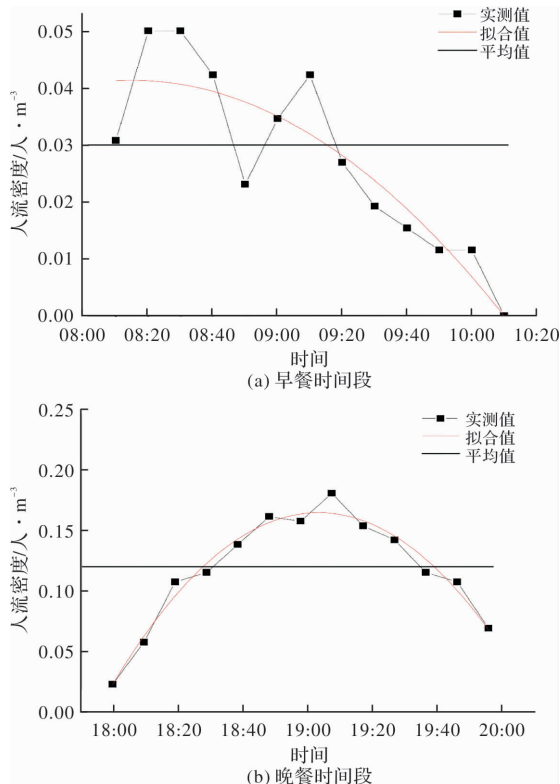


图5 餐厅不同时段人流密度拟合

Fig. 5 Fitting of restaurant pedestrian density at separate times

4 酒店空间感染时空分布

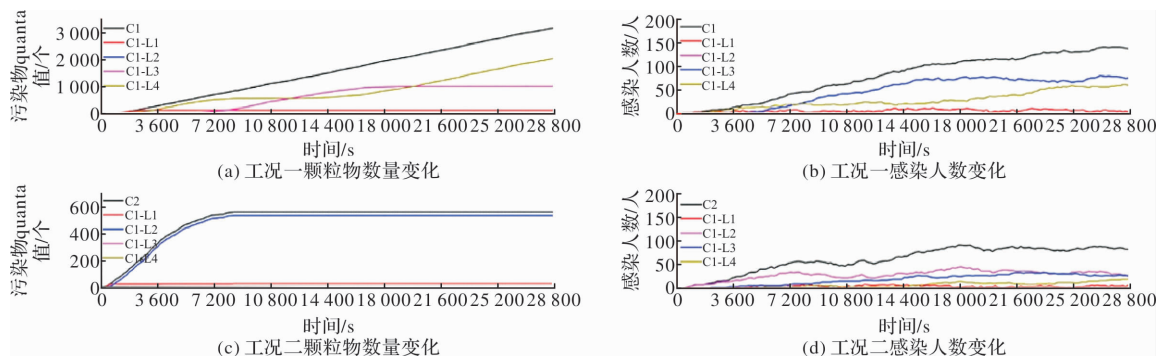
本研究假设：人群中出现潜在患者的比率为 1.7% ^[31]，选取 12:00~20:00 高峰时段进入酒店人数共计 473 人为总进入人数，进行 8 h 模拟；初始设定潜在患者为 7 人，人员进入速率为 59 人/h。

三种工况初始感染人群类型为住宿人群 7 人、就餐人群 7 人、商务会议人群 7 人；工况四为多类人群耦合感染，初始感染人群包括住宿人群 2 人、就餐人群 2 人、商务会议人群 2 人，后勤人员 1 人，对四种工况模拟结果进行分析。

4.1 基于单一人员类型感染状况模拟

由图 6(a)(b)(c)结果对比可知，单一人员流线感染状况下，三种工况污染物颗粒的总量不同，污染物颗粒数在工况一，即住宿人群感染工况下最高；其次是工况三商务会议人群感染工况；工况二就餐人群感染工况下污染物颗粒总量最少，污染物颗粒总量因人员类型酒店停留时间的不同而有所区别。三种工况下，住宿人群流线中污染物释放呈线性增加，释放速率 R_{C1} 介于 $0.09 \sim 0.14$ quanta/s 之间，建筑首层污染物颗粒释放速率 R_{C1L1} 介于 $0 \sim 0.06$ quanta/s 之间；在 $1.45 \sim 5.45$ h，三层污染物颗粒释放速率 R_{C1L3} 介于 $0.002 \sim 0.15$ quanta/s 之间； 0.35 h 后，客房层出现污染物颗粒，污染物颗粒释放速率 R_{C1L4} 介于 $0.01 \sim 0.15$ quanta/s 之间；各层污染物最终占比分别为 3.86% 、 0 、 31.59% 、 64.53% 。就餐人群感染工况下，在 $0 \sim 2.35$ h 总污染物数量保持增长， 2.35 h 后趋于稳定，释放速率 R_{C2L1} 介于 $0.008 \sim 0.13$ quanta/s 之间；二层区域污染物与总量变化趋势基本一致；各层污染物最终占比分别为 4.8% 、 95.2% 、 0 、 0 。商务会议人群感染工况下， $0 \sim 5.9$ h 总污染物数量保持增长， 5.9 h 后停止增长趋于稳定；释放速率 R_{C3} 介于 $0.005 \sim 0.14$ quanta/s 之间；三层污染物与总量变化趋势基本一致；各层污染物最终占比分别为 2.07% 、 0 、 97.93% 、 0 。

图 6(d)(e)(f)分别为三种工况下感染人数随时间变化结果，三种工况下的平均感染概率分别为 29.36% 、 17.87% 、 36.38% ；平均感染速率为 0.0048 人/s、 0.0029 人/s、 0.0059 人/s。三种工况下，三层感染人数占比最多，分别占总感染人数的 54.3% 、 34.5% 、 47.4% ；标准层感染人数占比次之，分别占总感染人数的 43.5% 、 25% 、 30.4% 。



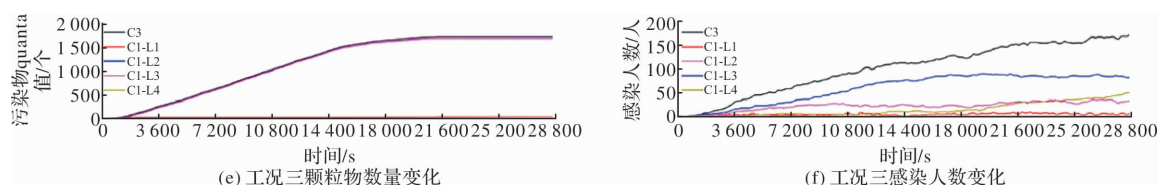


图6 三种不同工况下污染物颗粒物数量和感染人数变化

Fig. 6 Changes in the number of pollutant particles and the number of infected persons in three different experimental conditions

图7为污染物颗粒的时空分布图,图7(a)表明工况一中污染物颗粒积聚在三层和客房层;图7(b)表明工况二中污染物颗粒分布以二层为中心,一层、三层递减;图7(c)表明工况三中污染物颗粒分布以三层为中心,二层、客房层递减,各工况一层均有少量污染物。

综上,污染物颗粒分布主要与人员流线相关;垂直交通的交叉使不同人员类型交叉感染,因而工况二人员感染速率最低,感染人数最少;工况三因商务会议人群竖向交通与二层就餐人群有交叉;与住宿人群同楼层流线交叉,因而感染人数最多,平均感染速率最大。

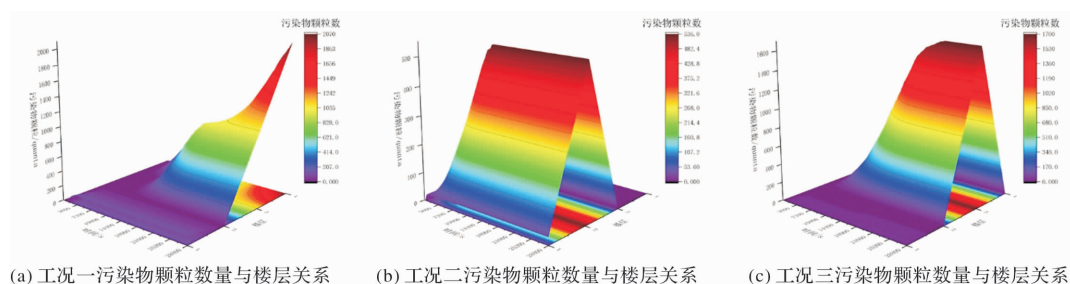


图7 三种不同工况下污染物颗粒的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of pollutant particles in three different experimental conditions

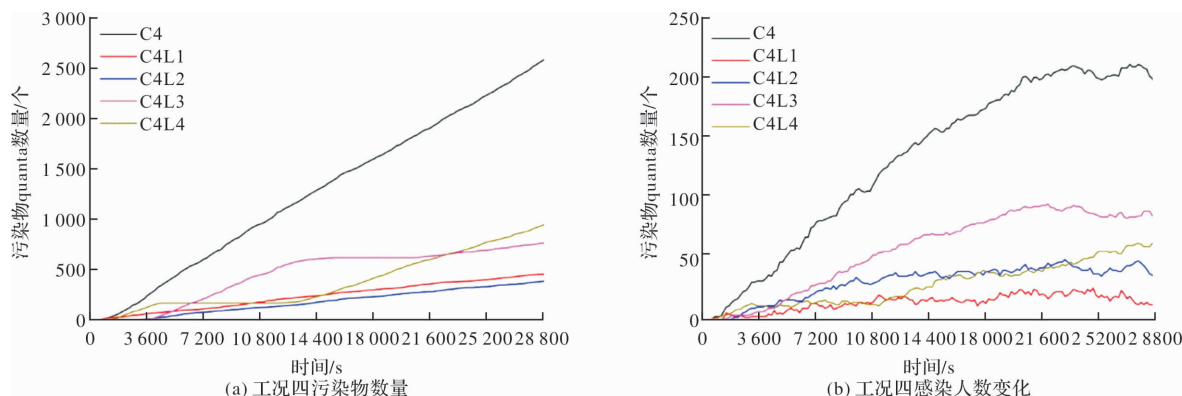
4.2 基于混合人员类型感染状况模拟

如图8(a)所示,当多类人群耦合感染工况下,污染物颗粒目总数随着时间的变化呈现线性增长,增长速率 R_{C4} 介于 $0.06 \sim 0.12$ quanta/s 之间;建筑首层污染物释放速率 R_{C4L1} 介于 $0.01 \sim 0.03$ quanta/s 之间;二层空间污染物释放速率 R_{C4L2} 介于 $0.003 \sim 0.03$ quanta/s 之间, $0 \sim 4.3$ h;三层污染物释放速率 R_{C4L3} 介于 $0.005 \sim 0.025$ quanta/s 之间,后趋于平缓, 5.6 h 后 R_{C4L3} 介于 $0.015 \sim 0.02$ quanta/s 之间; 1.5 min ~ 1.25 h,客房层污染物释放速率 R_{C4L4} 介于 $0.04 \sim 0.07$ quanta/s 之间, 3.3 h 后 R_{C4L4} 介于 $0.03 \sim 0.07$ quanta/s 之间。

如图8(b)所示,工况四中人员的感染状况整体呈现曲线波动增长,平均感染速率为 0.0069

人/s,总感染速率在 0.01 人/s 左右波动。一层最先出现感染人数, 5.7 h 后,感染速率减缓; 8 h 后,感染人数三层>客房层>一层>二层,各层感染人数占比分别为 6.5% 、 17.5% 、 44% 、 32% ;总感染概率达到 42.6% 。

图8(c)和图8(d)表明污染物及感染人员积聚在三层和客房层;污染物颗粒数量三层最先达到峰值、其次为标准层,二层最少;感染人员数量对比可知三层感染人员最先达到峰值,其次为客房层,一层感染人员最少。工况四中总污染物颗粒较工况三污染物颗粒数下降,感染人数较其增长 16.9% ,其中三楼、感染人数占比 44% ,表明流线交叉与感染人数呈正相关;多流线交叉中三层会议、餐厅人数为重点空间,感染人数进一步增大。



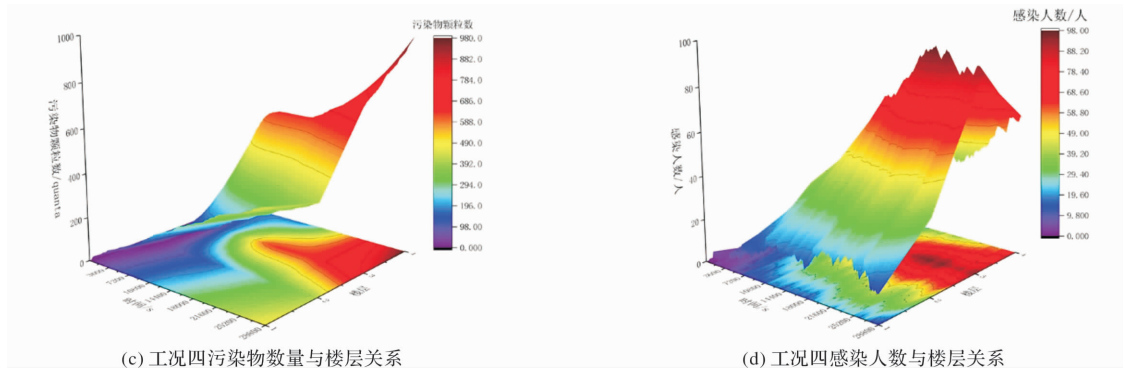


图8 工况四污染物颗粒物数量和感染人数变化

Fig.8 Changes in the number of pollutant particles and the number of infected persons in the fourth experimental condition

综上,三种人员流线以及后勤人员耦合感染时,人员感染集中在三层及客房层;人员流线交叉程度越大感染概率升高,且三层空间感染概率升高显著。

5 结论

本研究以具体酒店为研究对象,基于酒店人流活动轨迹的实地调研,获得酒店人流量以及服务时间,以 Wells-Riley 感染概率为核心,利用软件模拟对人员感染状态进行模拟以及分析,主要结论如下:

(1)当单一人员流线中存在感染患者,住宿人群、就餐人群、商务会议人群的感染概率分别为 29.3%, 17.9%, 36.4%; 各类人群共同感染情况下,人员感染概率为 42.6%;

(2)污染物颗粒的时空分布规律表明人员交叉与感染概率呈正相关,流线交叉较多的就餐空间、滞留时间较长休闲空间、竖向交通空间等为污染物重点集中空间;住宿人群与三层以及标准层流线交叉程度大,感染人数增长率较高;会议商务人群与三层及标准层流线交叉程度大,感染人数增长率最高;

(3)会议商务人群与住宿人群在三层交叉程度较大而导致感染概率较大. 因而建议满足疏散的情况下,额外增设商务功能电梯,并围绕增设电梯布置商务功能,并为商务人群分设就餐区,缩短垂直交通与就餐区距离,减少与就餐人员流线交叉以降低感染概率,后续将对于该策略进行深化研究;

(4)会议商务人群与餐饮人群流线交叉较大而导致感染概率较大. 因而对外餐饮与商务功能应分别设置独立出入口接待服务,与住宿人员流线出入口分开设置,污染物流线和后勤污物流线并行设置,未来将对该策略进一步细化研究;

(5)后勤人员与住宿人员的流线交叉较大. 客房层需区分清洁区、污染区并设置独立的消杀空间,污染物运输路径与后勤污物流线并行设置,以降低同楼层住宿人员交叉感染概率。

参考文献 References

- [1] 李玉国,程盼,钱华. 新型冠状病毒的主要传播途径及其对室内环境设计的影响[J]. 科学通报, 2021, 66 (Z1):417-423.
LI Yuguo, CHENG Pan, QIAN Hua. Dominant transmission route of SARS-CoV-2 and its implication to indoor environment[J]. Science Bulletin, 2021, 66 (Z1):417-423.
- [2] 朱妮,曹磊,杨国婧,等. 陕西本土新型冠状病毒肺炎无症状感染者流行特征及传播途径[J]. 西安交通大学学报(医学版), 2021, 42(2):186-189.
ZHU Ni, CAO Lei, YANG Guojing, et al. Epidemiological characteristics and transmission routes of COVID-19 asymptomatic infected patients in Shaanxi Province[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Medical Sciences), 2021, 42(2):186-189.
- [3] 袁朝晖,周延彬,崔加楹,等. 基于自然通风的长沙高校图书馆中庭形态研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(4):579-586.
YUAN Zhaohui, ZHOU Yanbin, CUI Jiaying, et al. Research on atrium form of Changsha university libraries based on natural ventilation[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52 (4):579-586.
- [4] 刘智伟,黄晶晶,张美峰. 酒店建筑平疫结合设计技术要点研究[J]. 建筑与文化, 2023(7):133-135.
LIU Zhiwei, HUANG Jingjing, ZHANG Meifeng. Research on the key points of design technology for the integration of hotel architecture and epidemic prevention[J]. Architecture and Culture, 2023(7), 133-135.
- [5] 卜德清,张勃. 数字时代酒店后线区域建筑设计[M].

- 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- BU Deqing, ZHANG Bo. Architecture design of BOH area for hotel in digital age[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2021.
- [6] RILEY E C, MURPHY G, RILEY R L. Airborne spread of measles in a suburban elementary school[J]. American Journal of Epidemiology, 1978, 107 (5): 421-432.
- [7] 钱华,郑晓红,张学军.呼吸道传染病空气传播的感染概率的预测模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 468-472.
- QIAN Hua, ZHENG Xiaohong, ZHANG Xuejun. Prediction of risk of airborne transmitted diseases[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(3): 468-472.
- [8] YANG X, OU C, YANG H, et al. Transmission of pathogen-laden expiratory droplets in a coach bus[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 397: 122609.
- [9] 吴家麟,翁文国.新冠肺炎病毒颗粒在空调大巴中的传播与乘客感染风险[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(2): 89-95.
- WU Jialin, WENG Wenguo. Transmission of COVID-19 viral particles and the risk of infection among passengers in air-conditioned buses[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61 (2): 89-95.
- [10] 张静,吕文超,李安桂,等.基于医疗废物高温蒸汽处理车间的通风方案优化及效果预测[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(5):742-752.
- ZHANG Jing, LV Wenchao, LI Angui, et al. Optimization and effect prediction of ventilation scheme for medical waste high-temperature steam treatment workshop[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(05): 742-752.
- [11] 黎家雄,唐海达,李春莹.基于人活动轨迹的住院楼新冠病毒气溶胶传播风险研究[J]. 建筑科学,2022, 38 (6): 88-96.
- LI Jiaxiong, TANG Haida, LI Chunying. The risk assessment of SARS-COV-2 Aerosol Transmission in in-patient Buildings based on human activity trajectory [J]. Building Science, 2022, 38(6): 88-96.
- [12] 刘刚,张亦弛,曲冠华,等.考虑人员密度分布的儿童医院候诊空间感染风险研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(12):1249-1261.
- LIU Gang, ZHANG Yichi, QU Guanhua. Risk of infection in the waiting rooms in children's hospitals considering population density distribution[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(12): 1249-1261.
- [13] 钟志涛,李春莹,唐海达.医院诊区空间设计探析与感染风险评价[J]. 城市建筑,2022,19(10):105-111.
- ZHONG Zhitao, LI Chunying, TANG Haida. Analysis on the spatial design of hospital consulting area and its infection risk assessment [J]. Urbanism and Architecture, 2022, 19(10): 105-111.
- [14] DONG Y, ZHU L, LI S, et al. Optimal design of building openings to reduce the risk of indoor respiratory epidemic infections[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022: 1-14.
- [15] 陈红兵,王文谦,王聪聪,等.北京某高校教室自然通风下新冠感染概率实验和模拟研究[J]. 暖通空调,2023, 53(5):124-129,135.
- CHEN Hongbing, WANG Wenqian, WANG Congcong, et al. Experimental and simulation study on infection rate of SARS-CoV-2 under natural ventilation in classrooms of a university in Beijing[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2023, 53 (5): 124-129,135.
- [16] SHAO X, LI X. COVID-19 transmission in the first presidential debate in 2020 [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(11):115125.
- [17] LIANG C, JIANG S, SHAO X, et al. Is it safe to re-open theaters during the COVID-19 pandemic? [J]. Frontiers in Built Environment, 2021, 7: 637277.
- [18] 陈国强,刘澜,陈玉婷,等.基于 Wells-Riley 模型的公交车辆内部 COVID-19 传播及防控研究[J]. 公路交通科技,2022,39(6):144-152.
- CHEN Guoqiang, LIU Lan, CHEN Yuting, et al. Study on spread and prevention of COVID-19 inside buses based on Wells-Riley model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(6): 144-152.
- [19] 马剑,李慧文,宋丹丹,等.校园通勤行人流时空伴随分析与疫情防控策略[J]. 中国安全科学学报,2022, 32 (9): 86-93.
- MA Jian, LI Huiwen, SONG Dandan, et al. Spatio-temporal concomitant analysis and epidemic control strategies for commuter pedestrian flow in campus[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 86-93.
- [20] 邓巧明,李晓峰,刘宇波.基于人流模拟方法的高校疫情防控研究——以华南理工大学为例[J]. 建筑技艺, 2022, 28(9): 30-33.
- DENG Qiaoming, LI Xiaofeng, LI Yubo. Research on the prevention and control of epidemic in campus based on the pedestrian flow simulation method[J]. Architecture Technique, 2022, 28(9): 30-33.
- [21] SUN C, ZHAI Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19

- transmission[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102390.
- [22] HARWEG T, BACHMANN D, WEICHERT F. Agent-based simulation of pedestrian dynamics for exposure time estimation in epidemic risk assessment[J]. *Journal of Public Health*, 2023, 31(2): 221-228.
- [23] NASYROV R. The study of the dynamics of the spread of viral infection in the premises of the critical infrastructure using a hybrid model on the example of a medical organization[C]//8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020). Ufa, Russia: Atlantis Press, 2020: 397-402.
- [24] 李瑞彬, 吴妍, 牛建磊, 等. 人体呼出颗粒物的传播特性及呼吸道传染病感染概率预测方法[J]. *暖通空调*, 2020, 50(9): 41-54.
- LI Ruibin, WU Yan, NIU Jianlei, et al. Transmission characteristics of human exhaled particles and risk prediction methods of respiratory infectious diseases[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2020, 50(9): 41-54.
- [25] XIAO S, LI Y, SUNG M, et al. A study of the probable transmission routes of MERS-CoV during the first hospital outbreak in the Republic of Korea[J]. *Indoor air*, 2018, 28(1): 51-63.
- [26] YANG W, GAO N P. The transport of gaseous pollutants due to stack effect in high-rise residential buildings[J]. *International Journal of Ventilation*, 2015, 14(2): 191-208.
- [27] 王冰冰, 薛聪聪, 王珊. 基于排队论和 Anylogic 仿真的三甲医院门诊采血区设计指标研究[J]. *建筑学报*, 2020, 22(S2): 185-189.
- WANG Bingbing, XUE Congcong, WANG Shan. Research on design indexes of outpatient blood collection area in grade III level a hospital based on queuing theory and anylogic simulation[J]. *The journal of Architecture*, 2020, 22(S2): 185-189.
- [28] 董嘉, 李力, 韩冬青. 模型法与模拟法对自发性活动人流密度预测的比较[J]. *新建筑*, 2018(3): 90-93.
- DONG Jia, LI Li, Han Dongqing. Comparison of modelling and simulation methods in predicting optional activity people density[J]. *New Architecture*, 2018(3): 90-93.
- [29] 赵加宁, 武丽霞, 王昭俊, 等. 大型超市客流量的调查与分析[J]. *暖通空调*, 2004(6): 53-56.
- ZHAO Jianing, WU Lixia, WANG Zhaojun et al. Investigation and analysis of consumer flow rate in large supermarket[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2004(6): 53-56.
- [30] 居发礼, 付祥钊. 医院门诊公共空间人流量特性及新风量需求[J]. *建筑科学*, 2017, 33(12): 110-116, 181.
- JU Fali, FU Xiangzhao. Characteristics of people flow and outdoor air requirement in outpatient department public area[J]. *Building Science*, 2017, 33(12): 110-116, 181.
- [31] CHEN X, CHEN Z, AZMAN A S, et al. Serological evidence of human infection with SARS-CoV-2: a systematic review and meta-analysis[J]. *The Lancet Global Health*, 2021, 9(5): e598-e609.

(编辑 李睿奇)