

考虑室内呼吸暴露风险的人群引流控制策略研究

Liang, Benbu; Xie, Kefan; van der Wal, Natalie; Liu, Jia

DOI

[10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.05.0842](https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.05.0842)

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

China Safety Science Journal

Citation (APA)

Liang, B., Xie, K., van der Wal, N., & Liu, J. (2022). 考虑室内呼吸暴露风险的人群引流控制策略研究. *China Safety Science Journal*, 32(5), 14-20. <https://doi.org/10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.05.0842>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

中文引用格式:梁本部,谢科范,VAN DER WAL N,等.考虑室内呼吸暴露风险的人群引流控制策略研究[J].中国安全科学学报,2022,32(5):14-20.

英文引用格式:LIANG Benbu, XIE Kefan, VAN DER WAL N, et al. Crowd intervention strategies considering indoor respiratory exposure risks [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 14-20.

考虑室内呼吸暴露风险的人群引流控制策略研究^{*}

梁本部^{1,2}, 谢科范^{**1}教授, VAN DER WAL Natalie²副教授, 刘嘉³副教授

(1 武汉理工大学 管理学院, 湖北 武汉 430070;

2 代尔夫特理工大学 技术政策与管理学院, 荷兰 代尔夫特 2628 BX;

3 中南财经政法大学 信息与安全工程学院, 湖北 武汉 430073)

中图分类号:X928.03

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.05.0842

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(72071212);武汉研究院开放性课题重点项目(IWHS20201002);国家自然科学基金委资助(202106950053)。

【摘要】 为明确重大疫情中人群引流控制策略对室内呼吸暴露风险的影响,基于改进的行人动力学模型和呼吸传染概率模型,构建一般室内情况下人群运动多种场景,借助多智能体仿真技术,模拟防护优化策略、流量优化策略和路线优化策略对呼吸暴露风险影响。研究结果表明:室内呼吸暴露风险主要取决于行人总流量、个体停留时间、运动路径规划和污染区域持续时间;在行人社交距离遵循行为方面,个体因必须保持设定的物理距离而形成延滞效应,这会进一步增加暴露于污染区域时间;口罩病原体渗透率越低、空间通风量越大,群体呼吸传染概率越小。

【关键词】 室内呼吸; 呼吸暴露风险; 人群引流控制策略; 呼吸传染; 行人动力学; 场景仿真

Crowd intervention strategies considering indoor respiratory exposure risks

LIANG Benbu^{1,2}, XIE Kefan¹, VAN DER WAL Natalie², LIU Jia³

(1 School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;

2 Faculty of Technology, Policy and Management, Delft University of Technology,

Delft 2628 BX, Netherlands; 3 School of Information and Safety Engineering,

Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In order to explore impacts of crowd intervention strategies on indoor respiratory exposure risks during major pandemics, a variety of crowd motion scenarios were established in general indoor conditions based on improved pedestrian dynamics model and respiratory infection probability model. Then, multi-agent simulation technology was utilized to simulate impacts of strategies, including protection optimization, pedestrian flow optimization and route optimization, on the exposure risks. The results show that indoor respiratory exposure risks are mainly determined by total pedestrian flow, individuals' stay length, movement route planning and duration of stay in contaminated areas. The carryover effect will be

* 文章编号:1003-3033(2022)05-0014-07; 收稿日期:2021-12-14; 修稿日期:2022-03-05

** 通信作者:谢科范(1963—),男,湖南益阳人,博士,二级教授,博士生导师,主要从事风险管理和应急疏散等方面的研究。E-mail: xkf@whut.edu.cn。

formed due to pedestrians' obedience behavior of social distancing, which will further increase exposure time to contaminated areas. The lower pathogen permeability of masks, and the greater space ventilation are, the lower infection probability the crowd will face.

Keywords: indoor breathing; respiratory exposure risk; crowd intervention strategy; respiratory infection; pedestrian dynamics; scenario simulation

0 引言

重大疫情因危害性强、影响规模大、持续时间长,严重威胁着人们的身心健康和公共卫生安全。如受新型冠状病毒肺炎疫情影响,各国采取了不同程度的封锁城市和保持社交距离等防疫举措,大量公众集聚活动被取消^[1]。虽然一系列非医疗干预措施能够极大减缓疾病传播,然而,采购必需品、就医等室内活动无法完全避免。因此,常态化疫情防控形势下,如何在复杂的人群运动中模拟和管控室内呼吸暴露风险,实施有效的人群引流控制策略,对科学精准防控疫情具有重要的理论价值和现实意义。

传染病在人群中的扩散是一个复杂过程,具有交互性和不确定性,人群活动的自组织性和个体不正确的防护行为,均会增大病毒扩散的潜在威胁。尤其对呼吸道传染病而言,病原体能够借助飞沫随着气流在空间中随机传播,一旦有行人进入污染区域,呼吸暴露风险将会大概率提升。一般而言,呼吸暴露风险主要取决于环境病原体浓度、危害性及该环境中个体或群体暴露行为。学者们对此展开了研究, MORAWSKA 等^[2]认为,必须加强室内活动空间空气暴露风险的工程控制,避免空气再循环和人群过度拥挤加速疾病传播;戢晓峰等^[3]采用公交暴露风险多尺度辨识方法,揭示了公交站点空间要素对呼吸暴露风险的影响;贾飞等^[4]基于相继平均法的改进算法,提出突发公共卫生事件下高速铁路客流分配和停靠方案,以优化列车上座率和降低感染概率。部分研究尝试将行人属性和行为规则与流行病模型相结合,如 HARWEG 等^[5]提出一种基于 agent 的微观模型,模拟传染病暴露风险下室内行人移动情况,能够实时监测个体在环境中的运动路径和暴露时间。VUORINEN 等^[6]将局部变化的气溶胶浓度水平纳入 Monte-Carlo 模型,发展了可定量考察易感者在公共场所暴露时间的新方法;郭云龙^[7]引入病毒传播密度概念,构建了公交车和小型私家车车内疾病传播模型,发现通过控制行车时间和车内人员换乘频率能够显著减缓病毒传播。综合现有研究,可以发现,针对呼吸暴露风险的研究主要聚焦于

宏观环境模型和微观个体模型,建立了较为系统的模拟体系,从整体尺度上探究了众多人群引导管控措施,如封锁社区、佩戴口罩、注意公共卫生、保持安全社交距离等对人群呼吸暴露风险的影响。然而,现有呼吸暴露模型并没有明确地耦合行人运动情况,特别是在室内场景下的人群管控方面,鲜有研究微观地定量评估人群引导策略对室内呼吸暴露风险的影响。

鉴于此,笔者拟通过构建一般室内情形下人群运动场景,综合运用行人动力学模型和呼吸传染概率模型,借助多场景仿真技术,模拟日常情景和实施人群引流控制策略下室内呼吸暴露风险,以期定量分析不同人群引流控制策略对行人暴露风险的影响,为管理者科学制定防疫政策提供参考。

1 理论基础与模型描述

1.1 行人动力学模型

人群运动是由个体行为和交互行为构成的复杂系统。基于经典力学理论,HELBING 等^[8]构建了著名的社会力模型(Social Force Model, SFM)。该模型能够再现自组织行为等人群运动现象,已被广泛应用于微观人群仿真。根据 SFM 可知:行人 i 的移动受到自驱力、吸引力和排斥力的综合影响,即:

$$m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = f_i^0(t) + \sum_j f_{ij}(t) + \sum_w f_{iw}(t) + \xi \quad (1)$$

式中: i 和 j 分别为不同的行人; w 为障碍物(如墙壁); m_i 为行人 i 的质量,kg; $v_i(t)$ 为行人 i 期望速度,m/s; $f_i^0(t)$ 、 $f_{ij}(t)$ 和 $f_{iw}(t)$ 分别为行人 i 在 t 时刻受到的目标吸引力、与其他行人 j 的排斥力和障碍物 w 排斥力,N; ξ 为行人随机扰动行为。

$$f_i^0(t) = m_i \frac{v_i^0 e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

$$f_{ij}(t) = A \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B}\right) \vec{n}_{ij} + \kappa \Theta(r_{ij} - d_{ij}) \vec{n}_{ij} + K \Theta(r_{ij} - d_{ij}) \vec{n}_{ij} \Delta v_{ij}(t) \quad (3)$$

$$f_{iw}(t) = A \exp\left(\frac{r_i - d_{iw}}{B}\right) \vec{n}_{iw} + \kappa \Theta(r_i - d_{iw}) \vec{n}_{iw} +$$

$$K\Theta(r_i - d_{iW})\mathbf{n}_{iW}\Delta\mathbf{v}_{iW}(t) \quad (4)$$

式中: A, B, κ, K 均为常数; r_i, r_{ij} 分别为行人 i 的半径及行人 i, j 半径之和, $m; d_{ij}, d_{iW}$ 分别为行人 i, j 之间、行人 i 与障碍物 W 之间的距离, $m; \mathbf{n}_{ij}, \mathbf{n}_{iW}$ 分别为行人 i, j 之间、行人 i 与障碍物 W 之间的单位方向向量; $\Delta\mathbf{v}(t)$ 为速度变化; 当 $\Theta(z)$ 中的参数 $z \geq 0$ 时, $\Theta(z) = z$, 否则 $\Theta(z) = 0$ 。

个体 i 在运动过程中会不断调整初始期望方向 $\mathbf{e}_i^0$ ($\|\mathbf{e}_i^0\| \in [-\theta, \theta]$) 以避免与其他行人和障碍物相撞, 同时又必须不断向目的地前进^[9]。在行人 i 的选择方向 $\alpha \in [-\theta, \theta]$ 时, 纳入其他行人运动情况和身体尺寸, 可以计算行人 i 首次发生碰撞的距离 $f(\alpha)$, 如果在该运动方向没有发生碰撞, 则将 $f(\alpha)$ 设为行人 i 视野内的最大距离 $d_{\max}, m$ 。因此, 行人 i 可以通过权衡沿目的地方向 α^{des} 运动和避免碰撞来选择下一步的运动方向, 即选择的期望方向应满足公式:

$$\alpha^* = \operatorname{argmin}\{d_{\max}^2 + f(\alpha)^2 - 2d_{\max}f(\alpha)\cos(\alpha^{\text{des}} - \alpha)\} \quad (5)$$

此时行人 i 应选择的期望方向 $\mathbf{e}_i^0 = (\cos\alpha^*, \sin\alpha^*)$ 。

1.2 呼吸传染概率模型

呼吸传染过程较为复杂, 主要会受到病原体浓度、种类、分布以及传播途径、宿主易感性等众多因素的影响, 而以上因素很难进行定量分析。基于 Wells 模型, 用 quanta 代表个体达到致病量的最小病原体数目, 设定吸入一个 quanta 量的个体平均感染概率服从泊松分布。其中, Well-Riley 模型被广泛应用于研究呼吸道传染病^[10]。考虑戴口罩的效果, 改进 Well-Riley 模型, 此时感染概率 P 可以表示为:

$$P = \frac{C}{S} = 1 - \exp\left(\frac{-\delta I q p T_e}{Q}\right) \quad (6)$$

式中: C 为一次爆发中新产生的被感染人数; S 为总易感人数; I 为感染人数; q 为某个感染者的 quanta 产生率, quanta/h; p 为呼吸通风量, m^3/s ; T_e 为暴露时间, s ; $\delta \in [0, 1]$ 表示口罩病原体渗透系数, $\delta = 1$ 代表病原体能够完全通过口罩渗透到人的呼吸道。 Q 为空间通风量, m^3/s ; 一般而言, $Q = \text{人体间距}(G) \times \text{人体呼吸气流辐射范围高度}(H) \times \text{局地风速}(U)$ 。

RONCHI 等^[11]将传染病呼吸暴露风险进一步划分为直接接触暴露、社交距离内的暴露(包括面对面暴露)、同一房间暴露和同一建筑物暴露等形

式。世界卫生组织建议任何与疑似病例或确诊病例在 1 m 范围内面对面暴露超过 15 min, 或直接有身体接触的人, 应被确认为密切接触者。可以看出, 暴露形式和暴露时间是影响室内呼吸暴露风险的重要因素。根据国家卫健委公布的《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第 8 版)》^[12], 新冠病毒的主要传播途径包括呼吸道飞沫和密切接触传播。因此, 文中将靠近感染者和接触污染区域作为主要呼吸暴露方式(图 1), 那么易感者 i 的暴露时间可以表示为:

$$T_e = \sum_{t_i^a}^{t_i^b} \left(\sum_{j=1}^{J(t)} \mu_{ij}(t) + \sum_{m=1}^{M(t)} \mu_{im}(t) \right) \quad (7)$$

式中: t_i^a 和 t_i^b 分别为易感者 i 进入和离开场地的时间, s ; $J(t)$ 为场地中感染者(包括无症状感染者)的数量; $\mu_{ij}(t)$ 为 i 在 t 时刻是否暴露于感染者 j , 即:

$$\mu_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{若 } d_{ij}(t) < d_s + r_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $d_{ij}(t)$ 为易感者 i 到感染者 j 的直线距离, m ; d_s 为呼吸暴露风险最大距离(即社交距离), m ; r_i 为 i 的身体半径, m 。同理, $\mu_{im}(t)$ 表示易感者 i 在 t 时刻是否暴露于污染区域 m , 即:

$$\mu_{im}(t) = \begin{cases} 1, & \text{若 } d_{im}(t) < L + r_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $d_{im}(t)$ 为 i 到污染区域 m 的直线距离, m ; L 为污染区域半径, m 。

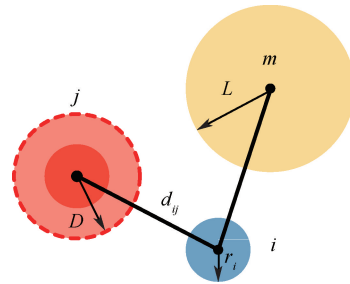


图 1 行人呼吸暴露风险

Fig.1 Pedestrian-based respiratory exposure risks

1.3 人群引流控制策略模型

人群引流控制策略就是基于行人动力学, 通过一系列人群流量方面的引导来降低个体呼吸暴露风险并减缓疾病传播的措施组合。根据相关研究, 从 3 个角度设计室内呼吸暴露风险引流控制策略: ①防护优化策略。对公共设施开展定期消杀, 提升 Q , 减少污染区域持续时间。对个体而言, 佩戴病原体渗透系数 δ 较小的口罩, 能减少感染者 quanta 传播率; 与其他行人保持安全的物理距离, 则有效减少

T_e 。②流量优化策略。通过限制整体人流量,或减少开放时间,或压缩行人停留时间,从而减少 T_e 。③路线优化策略。通过设置固定的行走路线,避免人群无序移动和面对面接触,限定包括感染者在内的所有行人的运动范围。

综合以上分析,SFM 确定了行人移动规则,为微观尺度上描述人群运动特征奠定了理论基础;改进的呼吸传染概率模型纳入宏观环境和个体防护参数,使得评价室内呼吸暴露风险有了依据;人群引流控制策略模型结合了上述模型中行人特质、暴露时间和防护行为等因素,为后续开展多场景仿真提供了理论支撑。

2 仿真场景与设计

2.1 行人参数设定

基于行人动力学和呼吸传染概率模型,以武汉市某商场为仿真和分析对象,抽象构建 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 室内场景,在该房间一侧对称设置 2 个宽为 1.8 m 的安全出口,区域内没有障碍物,行人可以自由行走。依据文献[8-9],设定行人 i 初始速度为 $v_i^0(t) \sim u[0.3\text{ m/s}, 0.7\text{ m/s}]$,行人 i 半径为 $r_i(t) \sim u[0.125\text{ m}, 0.25\text{ m}]$,视角 $\theta = 60^\circ$, $\tau_i = 0.5\text{ s}$,期望速度 $v_i(t) \sim u[0.9\text{ m/s}, 1.5\text{ m/s}]$, $A = 2 \times 10^3\text{ N}$, $B = 0.08\text{ m}$, $\kappa = 1.2 \times 10^5\text{ kg/s}^2$ 。按照国家卫健委和世界卫生组织推荐的安全社交距离,设定感染者呼吸暴露风险最大距离 $d_s = 1\text{ m}$ 。

对于室内场所而言,污染区域主要是由感染者打喷嚏、咳嗽等行为产生,有研究发现,感染者咳嗽在室内会形成半径为 2.5 m 且持续时间为 15 s 的污染区域^[13]。因此,确定污染区域半径 $L = 2.5\text{ m}$,持续时间 $T_p = 15\text{ s}$ 。参考文献[10],设定该场景中空气传染病的 $q = 122\text{ quanta/h}$,呼吸通风量 $p = 0.6\text{ m}^3/\text{h}$,人体呼吸气流辐射范围高度 $H = 1\text{ m}$,局地风速 $U = 3.9\text{ m/s}$ 。口罩的病原体渗透系数会因其材质和标准产生差异,市面上常用的颗粒物防护口罩和医用外科口罩的病原体渗透系数 δ 分别为 5% 和 30% ^[14]。暴露时间 T_e 作为变量,根据式(7)一式(9) 计算,将在多场景仿真中作为输出进行分析。

2.2 仿真场景设计

结合现实场景记录和美国马里兰大学 COVID-19 影响分析平台数据库^[15],设计对应于疫情爆发初期的基本仿真场景 S0。该区域每天营业 10 h ,开放时间内共有 $2\,400$ 名行人按照泊松分布抵达该区域,

且行人停留在区域时间 $T_s(t) \sim u[25, 27]\text{ min}$ 。假设人群中拥有初始感染率为 0.5% 感染者(无症状感染者),会每隔 30 s 因为咳嗽或打喷嚏产生半径 $L = 2.5\text{ m}$,且持续时间为 15 s 的污染区^[14],区域内的 2 个安全出口可以随意出入。违背社交距离的时间 T_w 和呼吸暴露时间 T_e (包括暴露于感染者时间 T_{e1} 和暴露于污染区域时间 T_{e2}) 作为变量通过多场景仿真输出。

根据人群引流控制策略模型,基于场景 S0 设计不同的优化场景:①对于防护优化策略,通过加强环境通风量 Q ,从而降低污染区域的持续时间 T_p ,场景设置为 S1-1 系列;同时,加强个体防护,病原体渗透系数 δ 各异的口罩会直接影响传染概率,而所有人保持不同的物理距离,对暴露时间可能会有不同的影响,场景设置为 S1-2 系列。②流量优化策略。是指通过控制人流总量、开放时间和停留时间来防控,场景设置分别为 S2-1 系列、S2-2 系列和 S2-3 系列。③路线优化策略。通过规定行人固定的行走路线来减少行人暴露时间,场景设置为 S3。为增加仿真结果的鲁棒性,所有场景重复仿真 5 次,并取平均值作为分析取值。表 1 为不同人群引流控制策略下的仿真场景设置。

表 1 不同人群引流控制策略下的仿真场景设置

Tab.1 Simulation scenario setting under different crowd intervention strategies

场景	人群数量	开放时间/h	停留时间/min	污染区持续时间/min	物理距离/m	行走路线
S0	2 400	10	$u(25, 27)$	3	0	自由活动
S1-1-1	—	—	—	2	—	—
S1-1-2	—	—	—	1	—	—
S1-1-3	—	—	—	0.5	—	—
S1-2-1	—	—	—	—	1	—
S1-2-2	—	—	—	—	1.5	—
S1-2-3	—	—	—	—	2	—
S2-1-1	2 000	—	—	—	—	—
S2-1-2	1 600	—	—	—	—	—
S2-1-3	1 200	—	—	—	—	—
S2-2-1	—	5	—	—	—	—
S2-2-2	1 200	5	—	—	—	—
S2-3-1	—	—	$u(23, 25)$	—	—	—
S2-3-2	—	—	$u(21, 23)$	—	—	—
S2-3-3	—	—	$u(19, 21)$	—	—	—
S3	—	—	—	—	—	既定路线

注:—表示与 S0 设置相同。

3 仿真结果与分析

3.1 基本场景仿真分析

为对比分析各类策略对室内呼吸暴露风险的影响,应首先了解场景 S0 中人群呼吸暴露情况。基于仿真设计,得到场景 S0 中违背社交距离时间和暴露时间。经统计,场景 S0 中行人违背社交距离时间大多分布在 $[800\text{ s}, 950\text{ s}]$,而总暴露时间则较为集中在 $[0\text{ s}, 50\text{ s}]$,其最大值分别对应为 $1\,254$ 和 500 s 。可以发现,虽然存在2种主要的呼吸暴露方式,由于拥有较大半径的污染区域能够持续更长时间,暴露于污染区域风险远超暴露于感染者风险。

3.2 人群引流控制策略下场景仿真分析

通过统计各个场景中行人违背社交距离时间和总暴露时间的均值(图2),能够比较人群引流控制策略对人群遵循社交距离行为和呼吸暴露时间的整体影响。以场景 S0 中总暴露时间均值(72.31 s)和违背社交距离均值(864.99 s)为基准分析各类人群引流控制策略的有效性。

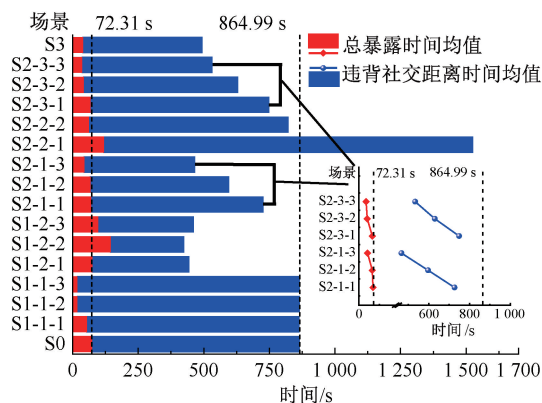


图2 各仿真场景结果

Fig.2 Simulation results of different scenarios

流量优化策略通过直接控制人流总量、开放时间和停留时间来减缓暴露风险,但在违背社交距离时间上,场景 S2-2-1 人均违背社交距离时间达到 $1\,525.65\text{ s}$,这是因为,同样的人流量在减半的开放时间(5 h)内涌入,虽然总体上控制了开放时间,但导致人流高峰蔓延现象,使得人均违背社交距离时间和总暴露时间相对于 S0 翻倍。在限定人流总量 S2-1 系列和控制行人停留时间 S2-3 系列的6个子场景中,由图2可以看出,人均违背社交距离和人均总暴露时间,均与人流总量和停留时间呈现正相关关系,即人流总量越小、停留时间越短,人群整体违背社交距离和总暴露时间越短。从人流优化策略内

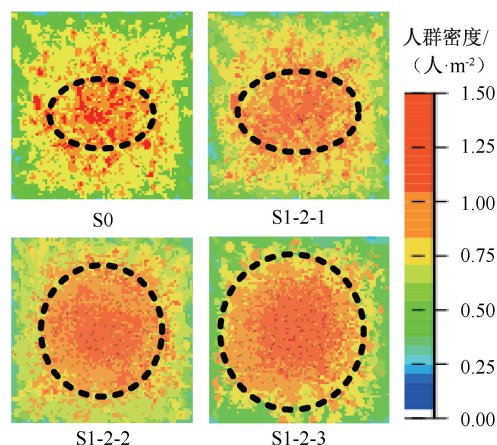
部横向比较而言,控制行人停留时间策略的斜率更大,说明其防控效率更高。而对于单纯限制人流总量策略,其斜率相对控制行人停留时间斜率明显较平缓,即限制人流总量策略对抑制疾病传播的边际效率不明显。

场景 S3 对应于路线优化策略,行人严格按照出入口和设定的行进轨迹移动,并区分出入口,行人严格按照出入口和设定的行进轨迹移动,主要原则是保证行人尽量按照同一个方向前进,而非随机活动。从图2可以看出,路线优化策略在不控制人群总量和减少开放与停留时间的前提下,能够减缓人群整体违背社交距离时间和总暴露时间,达到疫情防控、人群移动和场所开放需求的平衡。

场景 S1-1 系列和 S1-2 系列代表通过加强通风和保持物理距离的防护优化策略。从图2可以发现,场景 S1-2 系列虽然通过限定行人之间的物理距离,有效减少违背社交距离情况的发生,但同时也产生延滞效应。所谓延滞效应,即由于行人必须与周围个体保持限定的物理距离,导致局部区域中心个体停滞不前,从而降低整体的移动灵活性并降低空间使用效率。显然,缓慢的移动速度是延滞效应的重要表现,即移动速度缓慢的行人占比越多,则该区域延滞效应越显著。参考行人速度-密度基本图的相关研究^[10-11],行人速度会随着密度增大而减小,当人群密度为 $1\text{ 人}/\text{m}^2$,行人速度对应约为 0.2 m/s ,接近静止。因此,考察同一仿真时刻($t=2\,000\text{ s}$) S0 和 S1-2 系列中3个子场景的密度热力图(图3),可以直观发现,随着设定物理距离的增加,局部区域密度 $>1\text{ 人}/\text{m}^2$ (图3虚线部分)面积随之扩大,表明延滞效应随着设定物理距离的增加而更加显著。如果延滞区混入感染者,其产生的污染区将导致个体暴露于该区域的时间剧增。

3.3 呼吸暴露风险分析

基于呼吸传染概率模型和仿真结果,能够得到以口罩病原体渗透系数 δ 和总暴露时间为自变量的呼吸传染概率分布关系(图4)。整体来看,与生活经验一致的是,呼吸传染概率与口罩病原体渗透系数和总暴露时间成反比,特别是当行人正确佩戴口罩病原体渗透系数为5%的颗粒物防护口罩时,即便暴露较长时间也能维持在较低的呼吸传染概率水平。在日常生活中,民众更多选择是佩戴病原体渗透系数为30%的医用外科口罩,此时呼吸传染概率对总暴露时间较为敏感。参考文献[10],如果将呼吸传染概率 >0.1 设为高风险,根据式(6)和图4,此

图3 场景S0和S1-2系列人群密度热力图($t=2000s$)Fig.3 Crowd density heat maps in S0 and S1-2 ($t=2000s$)

时总暴露时间阈值约为200 s。

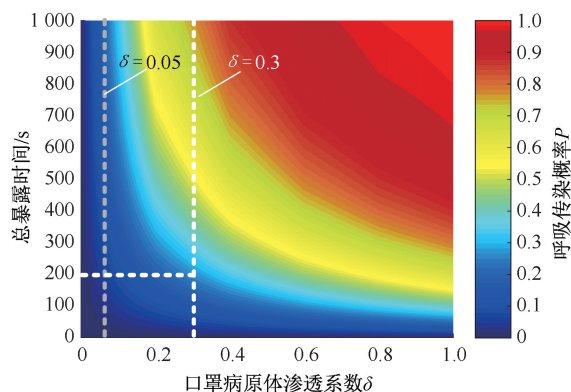


图4 呼吸传染概率分布

Fig.4 Distribution of respiratory infection probability

图5为各场景呼吸暴露风险分析。各个仿真场景中总暴露时间超过200 s的个体人数可反映场所开放时间内具有高呼吸暴露风险的行人数量。由图5可以发现,在民众普遍正确佩戴医用外科口罩情况下,只有场景S1-1-2、S1-1-3、S2-3-3和S3中处于高风险的人数低于10人,而场景S1-2-2、S1-2-3和S2-1-1中处于高风险的人数均超过S0,再次印证保持物理距离的延滞效应和限制人流总量策略边际效率不明显现象。

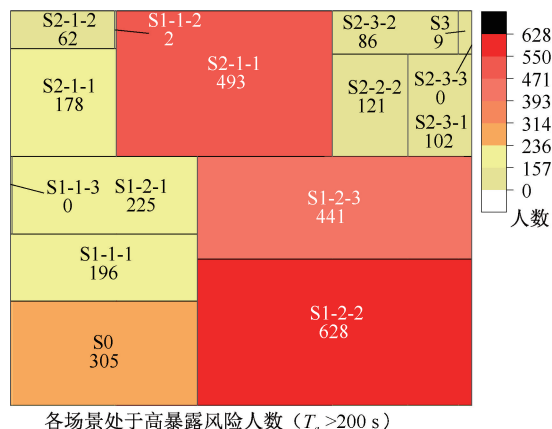
各场景处于高暴露风险人数 ($T_e > 200s$)

图5 各场景呼吸暴露风险分析

Fig.5 Respiratory exposure risk analysis for different scenarios

4 结论

1) 在采取人群引流控制策略时,如果只是简单地限制人群保持物理距离,行人容易受到延滞效应影响,局部区域密度 >1 人/ m^2 的面积随着限定物理距离的增长而扩大,使得公众因必须遵守物理距离而牺牲移动灵活性,从而导致暴露于污染区域的时间不降反升。

2) 在同等人流量情况下,如果只是缩短开放时间,公众会在限定时间内持续涌入,发生人群流量高峰蔓延现象。此时人均违背社交距离时间和总暴露时间均与开放时间成反比,即相同人群规模下,开放时间越短,公众呼吸暴露风险越高。

3) 减少行人停留时间、加强通风和设定路径规划,在有效平衡行人出行和商家开放需求的同时,能够做到与其他人群引流控制相当的防控效果,并且能够大幅度降低处于高暴露风险($T_e > 200s$)人数,对疫情防控边际效率更高。由此针对该室内场所提出具体的人群引流控制策略建议:①加强区域通风和消毒,设置适当的安全社交距离提示;②实行预约机制对人群流量进行合理分流;③规划行人运动轨迹,减少人流交叉暴露机会。

参考文献

- [1] XIE Kefan, LIANG Benbu, DULEBENETS M A, et al. The impact of risk perception on social distancing during the COVID-19 pandemic in China[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2020, 17(17): DOI: 10.3390/ijerph17176256.
- [2] MORAWSKA L, TANG J W, BAHNFLETH W, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimized? [J]. Environment International, 2020, 142: DOI: 10.1016/j.envint.2020.105832.

- [3] 戡晓峰, 吴亚欣, 毛润彩, 等. 突发公共卫生事件下公交暴露风险辨识方法: 以深圳应对新型冠状病毒肺炎为例[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 89-98.
JI Xiaofeng, WU Yaxin, MAO Runcai, et al. Identification method of bus exposure risk under public health emergencies: taking Shenzhen's fight against COVID-19 as an example[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(2): 89-98.
- [4] 贾飞, 孟学雷, 贾宝通, 等. 突发公共卫生事件下高速铁路客流分配研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 153-160.
JIA Fei, MENG Xuelei, JIA Baotong, et al. Research on passenger flow assignment for high-speed railway under public health emergencies[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 153-160.
- [5] 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, 2021: DOI: 10.1007/s10389-021-01489-y.
- [6] VUORINEN V, AARNIO M, ALAVA M, et al. Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors[J]. Safety Science, 2020, 130: 1-23.
- [7] 郭云龙. 基于 SIR 模型的机动车内传染病传播研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 173-178.
GUO Yunlong. Research on transmission of infectious diseases in motor vehicles based on SIR model [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 173-178.
- [8] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407: 487-490.
- [9] XIE Kefan, LIANG Benbu, SONG Yu, et al. Analysis of walking-edge effect in train station evacuation scenarios: a sustainable transportation perspective[J]. Sustainability, 2019, 11(24): DOI: 10.3390/su11247188.
- [10] 李绥, 陈雨萌, 石铁矛, 等. 面向大气防疫的城市公共空间呼吸暴露风险评价[J]. 城市规划, 2020, 44(8): 21-32.
LI Sui, CHEN Yumeng, SHI Tiemao, et al. Risk assessment of respiratory exposure in urban public space for air epidemic prevention [J]. Spatial Planning, 2020, 44(8): 21-32.
- [11] RONCHI E, LOVREGGIO R. EXPOSED: an occupant exposure model for confined spaces to retrofit crowd models during a pandemic[J]. Safety Science, 2020, 130: 1-8.
- [12] 国家卫生健康委办公厅, 国家中医药管理局办公室. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第 8 版 修订版)[Z]. 2021-04-14.
- [13] LOH N, TAN Yanni, TACULOD J, et al. The impact of high-flow nasal cannula (HFNC) on coughing distance: implications on its use during the novel coronavirus disease outbreak[J]. Canadian Journal of Anesthesia, 2020, 67(7): 893-894.
- [14] DEREK C, AKL E A, DUDA S, et al. Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis [J]. The Lancet, 2020, 395(10242): 1973-1987.
- [15] PAN Yixuan, DARZI A, KABIRI A, et al. Quantifying human mobility behaviour changes during the COVID-19 outbreak in the United States[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-9.



作者简介: 梁本部 (1992—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 研究方向为风险管理、人群疏散和建模仿真等。E-mail: liangbenbu@whut.edu.cn。