

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-484-09

地铁车厢内气流特性及飞沫病毒扩散规律

陈 熙 张登春 唐 睿 吴业胜

(湖南科技大学土木工程学院 湘潭 411201)

【摘 要】 针对夏热冬冷地区 B 型地铁, 运用 ANSYS 软件、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 建立车厢内流场和飞沫病毒传播的仿真模型, 选取某实际运营的地铁线路中连续站点进行实时环境参数数据采集, 研究不同立席密度下车厢内气流特性及飞沫病毒扩散规律。结果表明: 立席密度增大加剧了气流阻力, 车厢内出现气流分层现象; 乘客作为热源和污染源使车厢内温度升高、CO₂ 浓度增大, 乘客膝盖区和站姿头部区分别出现温度和 CO₂ 浓度峰值; 采用变风量送风控制, 立席密度为 7 人/m² 相较于 1 人/m² 时, 车厢内平均风速增大 57.03%, 平均温度和 CO₂ 浓度分别增大 5.19% 和 9.78%。立席密度越大, 飞沫颗粒停留时间越长; 随着立席密度增大, 飞沫颗粒传播范围缩小 0.5 m, 但沉积的粒子数减少了 52.9%, 多数粒子附着于人体表面, 增加了感染风险。

【关键词】 地铁车厢; 立席密度; 气流特性; 飞沫病毒扩散; 数值模拟

中图分类号 U231+.5 文献标志码 A

Airflow Characteristics and Droplet Virus Diffusion Law in Subway Cars

Chen Xi Zhang Dengchun Tang Rui Wu Yesheng

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201)

【Abstract】 For a type B subway in hot-summer and cold-winter region, a simulation model of airflow field and droplet-borne virus transmission in the car was established using ANSYS software with the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. Real-time environmental parameters were collected from consecutive stations along an actual operating subway line. The study investigated the effects of different standing densities on airflow characteristics and droplet virus dispersion. The results show that the increase of standing density intensifies airflow resistance, leading to airflow stratification in the car. Passengers acting as heat and pollutant source, raises the temperature and CO₂ concentration, with temperature and CO₂ concentration peaks occur at the knee level and the standing head level respectively. Under variable air volume supply control, when the standing densities increase from 1 person/m² to 7 persons/m², the average air velocity in the car increases by 57.03%, and the average temperature and CO₂ concentration increase by 5.19% and 9.78%, respectively. The higher the standing density, the longer the particles remain in the car. As standing density increases, the dispersion range of droplets shrank by 0.5 m, but the number of deposited particles decrease by 52.9%, with most particles adhering to human surfaces and elevating the infection risk.

【Keywords】 Subway car; Standing density; Airflow characteristics; Droplet virus diffusion; Numerical simulation

0 引言

随着城市化进程加快, 地铁成为市民日常出行

的重要交通工具, 车厢内空气品质直接影响乘客身体健康^[1,2]。乘客舒适度是地铁车厢环境的重要指

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ50122); 2021 年湘潭市第三批长株潭国家自主创新示范区建设专项(CG-ZDGS20211005)

作者简介: 陈 熙 (1999.11-), 女, 硕士研究生, E-mail: 3418385509@qq.com

通讯作者: 张登春 (1972.10-), 男, 博士, 教授, E-mail: dczhang2000@126.com

收稿日期: 2026-03-24

标,罗紫冰等^[3]发现人体特征与车厢内热环境参数共同决定了人体的热舒适感觉;张育惠^[4]发现气流感、PET(生理等效温度)、空气可接受度、服装热阻与BMI(身体质量指数)是影响冬夏两季热湿感觉的关键因素;李福韩等^[5]研究表明立席密度的波动影响地铁车厢内气流组织均匀性,立席密度越大,车厢内气流和温度紊乱情况越严重。现有研究^[6-9]指出,地铁车厢环境密闭、换气有限,高峰期人员密集,为污染物的传播提供了滞留和扩散条件。许俊等^[10]测量发现地铁车厢内CO₂浓度主要受控于人员密度;王新伟^[11]实测调查结果表明,地铁车厢内CO₂浓度与载客量关系较大,高峰时段相较于平峰时段车厢内CO₂浓度明显增大。

乘客咳嗽时会产生大量携带病毒的微小飞沫,容易造成交叉感染^[12-14]。公共卫生学家Wells WF^[15]、RILEY EC等^[16]提出了液滴核理论:人体呼吸道产生的含病原微滴可在空气中长时间悬浮并缓慢沉降。关于地铁车厢中飞沫气溶胶扩散的研究,李恒奎^[17]研究发现地铁车厢门开闭方式会对飞沫扩散产生不同影响;陈岫^[18]研究了列车运行高峰时期车厢内气流组织对污染颗粒物扩散与感染概率的影响,发现优化车厢内送排风方式可有效降低感染风险;伍钒等^[19]指出分散回风比集中回风能使车厢内速度场和温度场更均匀,并可迅速带走乘客呼出的飞沫,缩短暴露时间;薛宇等^[20]研究发现佩戴口罩能将飞沫扩散范围降低36%;戴文婷^[21]研究发现座位布局参数(间距、排距)影响飞沫扩散与感染风险;液滴粒径越大,沉积越快、沉积率越高;高凡凡等^[22]提出飞沫颗粒运动主要受人体与环境温差及呼气速率的影响。

现有研究一般基于单一乘客模型的飞沫扩散规律,对不同立席密度下地铁车厢内飞沫传播的研究较少。本文采用现场实测和数值模拟相结合的方法,针对车厢内乘客数量的变化,研究不同立席密度下车厢内气流特性和含病毒飞沫颗粒的扩散规律,以期高浓度飞沫区域局部通风控制、地铁人员飞沫病毒防护安全距离提供参考。

1 数值计算模型

1.1 物理模型

本研究基于长沙地铁B型车厢实测数据构建物理模型,车厢具体尺寸为:长21.8m(Z轴方向),宽2.8m(X轴方向),高2.1m(Y轴方向),其中内部净高(吊顶至地板)2.0m,如图1所示。车厢内气流组织方式采用上送上回,顶部两侧设86个小送风口,单个送风口尺寸为200mm×100mm。3个回风口均匀分布于车厢顶部中央,单个尺寸为540mm×440mm。座椅尺寸为长×宽×高=2700mm×400mm×400mm。飞沫释放源乘客位于车厢中部回风口正下方,距车厢侧墙1.1m、端部10.9m。

立席密度 ρ_s 指车厢内可用站立面积上单位面积所容纳的乘客数(人/m²),用于描述地铁等公共交通工具中站立区域的拥挤程度。车厢内立席密度与乘客数量关系如表1所示,本研究选取具有代表性的 $\rho_s=1$ 人/m²、 $\rho_s=3$ 人/m²、 $\rho_s=5$ 人/m²和 $\rho_s=7$ 人/m²。车厢采用变风量送风^[23],送风量 G 由不同立席密度时车厢内冷负荷确定,新风量 G_2 由车厢内乘客数确定。不同立席密度下对应的送风量、新风量及送风速度 v 如表2所示。

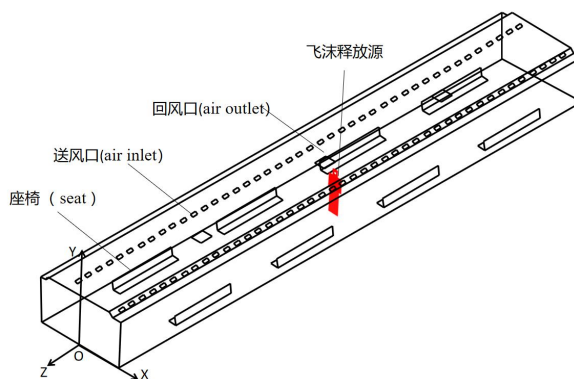


图1 B型地铁车厢几何模型

Fig.1 Geometric model of type B subway car

表 1 B 型车立席密度与乘客数量关系

Table 1 Relationship between standing density and passenger number of Type B cars

车厢人员	$\rho_s/(\text{人}\cdot\text{m}^2)$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
站姿乘客	34	68	102	136	170	204	238	272
坐姿乘客	48	48	48	48	48	48	48	48
合计	82	116	150	184	218	252	286	320

表 2 不同立席密度下送风量及送风速度

Table 2 Air supply volume and air supply velocity under different standing densities

$\rho_s/(\text{人}\cdot\text{m}^2)$	$G/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	$t_0/^\circ\text{C}$	$U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_2/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$
1	5035	20	0.8	1008
3	7375	20	1.2	1864.8
5	9868	20	1.6	2721.6
7	12056	20	2.0	3578.4

1.2 数学模型

采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 该模型在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上引入涡旋修正项, 能准确反映复杂障碍物干扰下的湍流特征, 适用于模拟载客时车厢内的实际气流环境。

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\partial_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho a_j \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho a_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; k 为湍流动能, J ; ε 为湍流动能耗散率; u_i 为 i 方向的速度分量, m/s ; x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 方向的坐标分量, m ; μ_{eff} 为有效黏性系数; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能产生项, J ; α_k 、 α_ε 分别为 k 和 ε 有效普朗特数的倒数; 经验常数 $C_{1\varepsilon}=1.42$, $C_{2\varepsilon}=1.68$ 。

飞沫病毒传播采用两相流^[24]方法进行求解, 车厢内空气为连续相, 飞沫粒子为离散相。假设颗粒为球形, 考虑颗粒的重力 F_G 、浮力 F_b 和曳力 F_D , 如式 (4) ~ (6) 所示。

$$F_G = m_p g = \frac{1}{6} \pi \rho_p d_p^3 g \quad (4)$$

$$F_b = \frac{1}{6} \pi \rho d_p^3 g \quad (5)$$

$$F_D = \frac{1}{8 C_u} \pi d_p^2 C_D \rho |u - u_p| (u - u_p) \quad (6)$$

式中: ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒的空气动力学直径, m ; C_u 为库宁汉修正系数; u 为空气速度, m/s ; u_p 为颗粒速度, m/s ; C_D 为球形颗粒阻力系数。

2 计算方法及边界条件处理

采用 ANSYS Fluent 软件平台进行计算, 采用非定常雷诺时均法 (Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes, URANS) 和拉格朗日离散相方法 (Discrete Phase Model, DPM) 来模拟车厢内气流与飞沫的耦合运动。数值求解过程中, 通过控制容积法对控制方程进行离散化处理, 其中对流项和扩散项采用具有二阶精度的幂函数差分格式进行离散, 压力-速度耦合问题通过 SIMPLE 算法进行迭代求解。

根据车厢内空调运行参数及相关规范^[25], 壁面采用无滑移条件。依据文献^[26]模拟车厢内夏季工况, 以送风口实测数据为入口边界条件, 实测送风温度为 20°C , 送风速度为 $1.13\text{m}/\text{s}$ 。回风口为压力出口 $P=P_{\text{out}}$; 列车运行期间室外气温 35°C , 车体传热系数取 $2.4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 将乘客模型设置为 36.5°C 的热源; 每位乘客呼出的 CO_2 浓度按成年人在安静状态 $18\text{L}/\text{h}$ 计算, 换算成质量浓度为 $9.89 \times 10^{-3}\text{g}/\text{s}$ 。

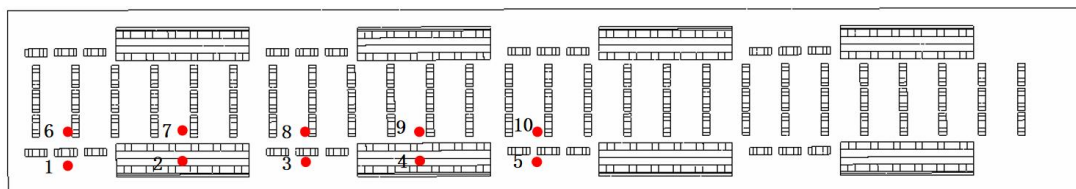
由文献^[27,28]相关数据, 飞沫由 98.2% 的水 (密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$) 和飞沫核 (密度为 $2170\text{kg}/\text{m}^3$) 组成, 模拟中设定飞沫初始粒径为 $10\mu\text{m}$, 以 $10\text{m}/\text{s}$ 的初速度从感染源乘客口部喷射而出 (该速度值与人体咳嗽时飞沫喷射速度相符), 喷射持续时间为 1s 。

3 实验验证

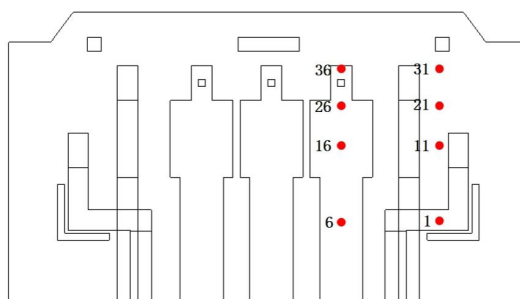
3.1 实验仪器及路线

取 1/4 节车厢作为实验对象, 布置 40 个测点, 并对每个区域的测点进行编号, 如图 2 所示。采用 TSI 风速仪 (9565-P) 进行风速测量, 空气质量检测仪 (DT-9883) 进行温度和 CO_2 浓度测量。选取长沙市地铁 3 号线进行连续实测 (中南大学站至四方坪站)。3 位测试者手持仪器分别测量位于 $X=0.5\text{m}$ 和 $X=1.0\text{m}$ 断面处, 采集 $Y=1.7\text{m}$ (站姿头

部)、1.5m(站姿胸膛)、1.2m(坐姿头部)和 0.5m(膝盖)处的风速、温度和 CO_2 浓度。



(a) 俯视图 (XZ 截面)



(b) 左视图 (XY 截面)

图2 测点布置

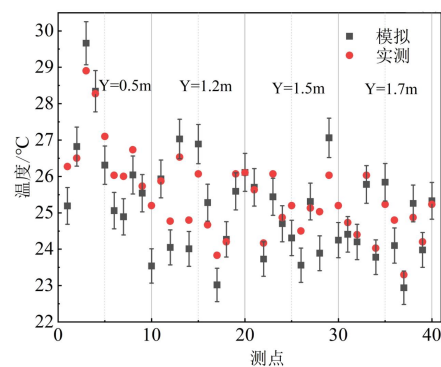
Fig.2 Layout of measurement points

3.2 计算结果与实测对比分析

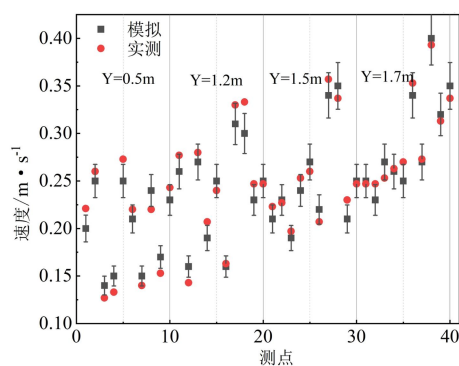
根据测量当天实际客流量, 对应立席密度 $\rho_s=3$ 人/ m^2 模拟结果与实测数据进行对比。图3

(a)~(c)为数值计算结果与实测值的对比, 图3(d)为在相同情况下, 不考虑人体发热与室内通风, 初始粒径为 $100\mu\text{m}$ 时的飞沫扩散结果与 Liu 等^[29]飞沫扩散模型的对比。由图3(a)~(c)可知, 风速、温度和 CO_2 浓度的平均相对误差分别为 5.48%、2.24%、5.46%, 最大相对误差分别出现在测点4、8和10位置, 分别为 9.33%、9.57%和 7.09%, 模拟值和实测值变化趋势相同, 吻合较好。由图3

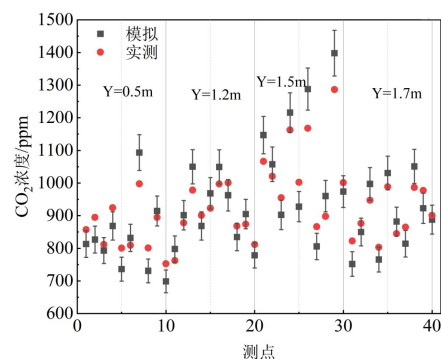
(d)可知, 本计算结果与文献^[29]计算结果吻合程度较高, 飞沫扩散规律与该文献基本一致。



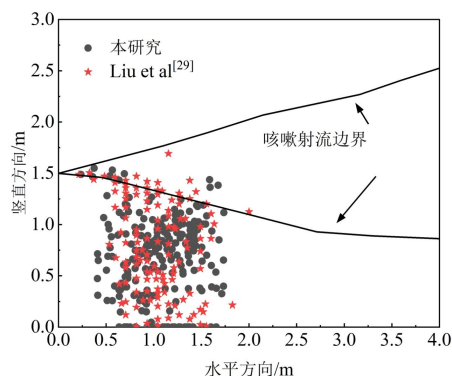
(b) 温度对比图



(a) 速度对比图



(c) CO_2 浓度对比图



(d) 飞沫模拟结果与文献[29]对比

图3 数值计算和实测结果对比图

Fig.3 Comparison of numerical calculation and measured results

4 不同立席密度的计算结果分析

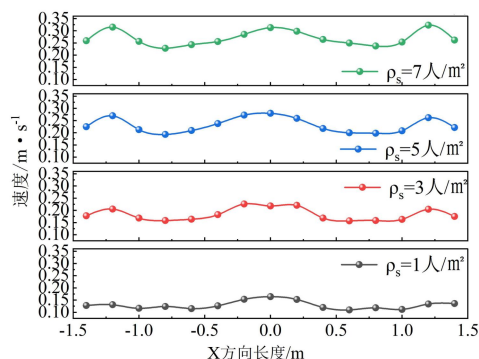
4.1 立席密度对车厢内气流特性的影响

图4、5、6分别为不同立席密度下车厢内风速、温度和 CO_2 浓度变化趋势。乘客较少时(立席密度为1、3人/ m^2)，站姿头部以及膝盖之间的平均风速增幅为0.14 m/s，平均温差低于 2°C ，平均温度增幅为 1.5°C ，平均 CO_2 浓度为800ppm；拥挤情况下(立席密度为5、7人/ m^2)，平均风速增幅为0.07m/s，车厢中部由于乘客增多，最大平均温差达到 4°C ，平均温度增幅在 1°C 以内，平均 CO_2 浓度为1070ppm。

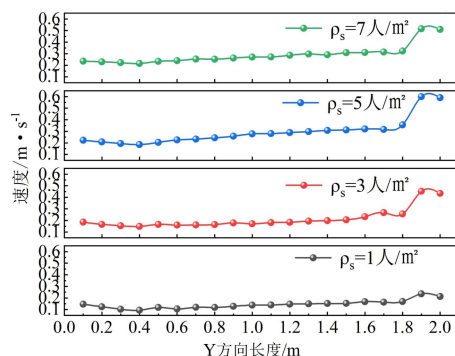
由图4可知，立席密度增大使车厢风速呈垂直分层：底部至膝盖处平均风速约0.15m/s；膝盖至胸部区域为0.2~0.3m/s；头部以上风速可达0.4m/s，导致明显吹风感并伴有气流短路现象。该现象源于乘客增多阻碍送风射流，促使气流在头部高度提前分离形成中高风速区；同时，车厢底部因送风难以完全到达且受人体热羽流抑制，形成中低风速区。

由图5可知，车厢垂直温度分布随高度变化明显：底部至膝盖温度上升，膝盖至头部温度平缓，1.8m以上则显著下降。立席密度为7人/ m^2 时，头部与膝盖温差达 4°C ，低立席密度时头部与膝盖温差为 2°C ，立席密度增大，相同风量变化下温差加剧。原因是乘客散热增加且送风调节作用减弱，强化了温度分层。

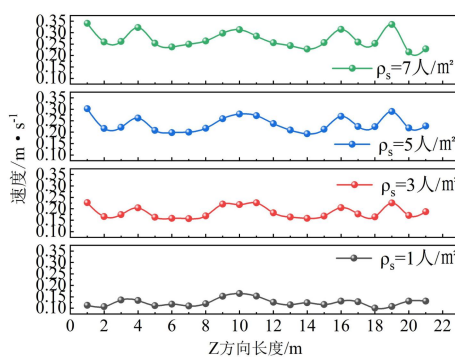
由图6可知，车厢内 CO_2 浓度随高度增加而上升，于1.5~1.6m处达到峰值，1.2m区因气流下沉影响形成次高峰；1.8m以上因靠近风口，浓度低于中部区域；立席密度增大导致 CO_2 浓度整体升高，且空气流通受限形成明显浓度分层：呼吸区浓度高，人群外围浓度低。原因是乘客增多， CO_2 浓度释放总量增加，同时阻碍气流运动，削弱送风对 CO_2 的稀释作用。



(a) X方向风速变化



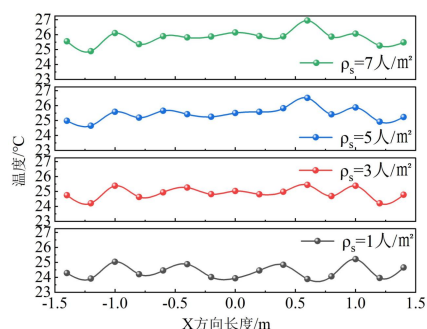
(b) Y方向风速变化



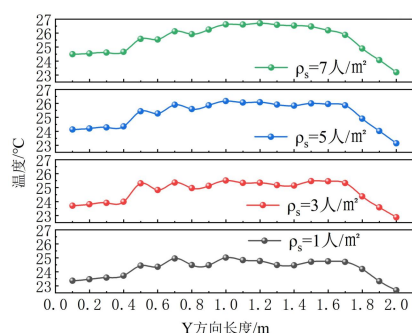
(c) Z方向风速变化

图4 不同立席密度下风速变化

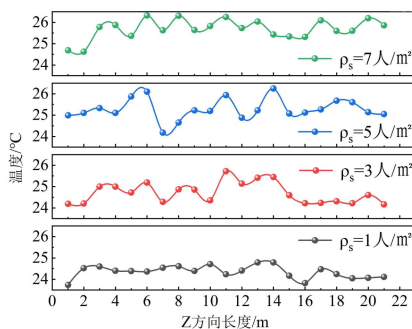
Fig.4 Variation of air velocity under different standing densities



(a) X方向温度变化



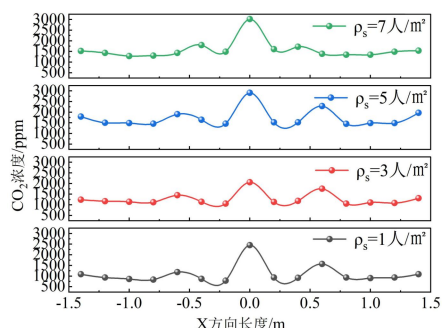
(b) Y方向温度变化



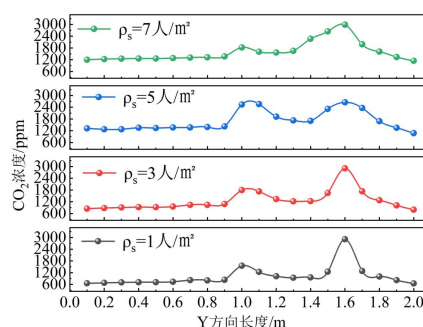
(c) Z方向温度变化

图5 不同立席密度下温度变化

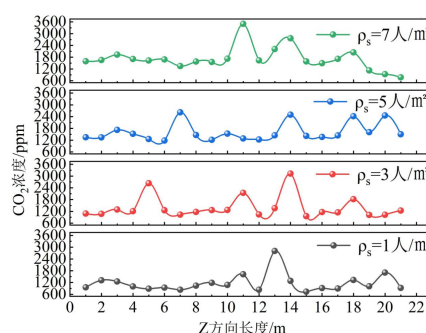
Fig.5 Temperature variation under different standing densities



(a) X方向CO2浓度变化



(b) Y方向CO2浓度变化



(c) Z方向CO2浓度变化

图6 不同立席密度下CO2浓度变化

Fig.6 Variation of CO₂ concentration under different standing densities

4.2 立席密度对车厢内飞沫病毒扩散的影响

图7为不同立席密度下飞沫扩散20 s时的状态图。由图7知, $\rho_s=1$ 人/ m^2 时, 飞沫传播距离为-0.4~1.15m, 飞沫覆盖范围内乘客数量为16人; 飞沫颗粒随气流运动逐渐扩散到周围乘客附近, 受气流影响, 扩散范围增大。 $\rho_s=3$ 人/ m^2 时, 飞沫传播距离为-0.3~0.95m, 飞沫覆盖范围内乘客数量为29人; 飞沫随气流扩散的同时, 由于回风口负压的作用将飞沫稀释, 由于此时乘客站位比较均匀, 对飞沫的扩散有一定阻碍, 扩散范围减小。 $\rho_s=5$ 人/ m^2 时, 飞沫传播距离为-0.3~0.75m, 飞沫覆盖范围内乘客数量为30人; 飞沫被稀释程度降低, 飞沫覆盖范围内的乘客数量增多。 $\rho_s=7$ 人/ m^2 时, 飞沫传播距离为-0.3~0.65m, 飞沫覆盖范围内乘客数量为32人; 随立席密度增加, 飞沫传播范围逐渐减小, 但飞沫传播范围内感染人员大量增加, 且飞沫稀释速度降低, 其在车厢内停留时间延长, 乘客所受影响加剧。

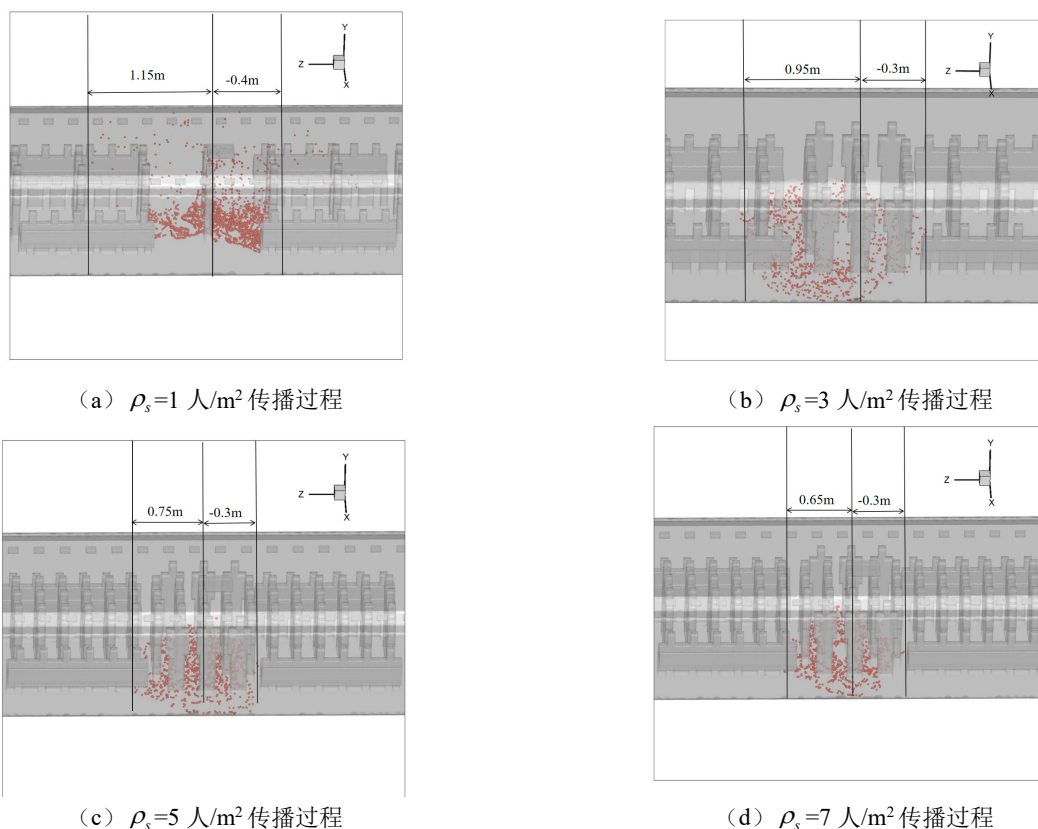


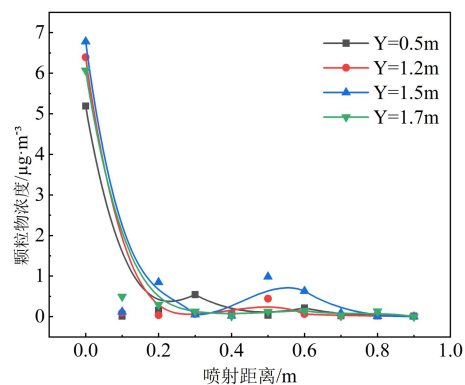
图 7 不同立席密度下飞沫扩散 20s 时的状态图

Fig.7 State diagram of droplet diffusion at different standing densities for 20 seconds

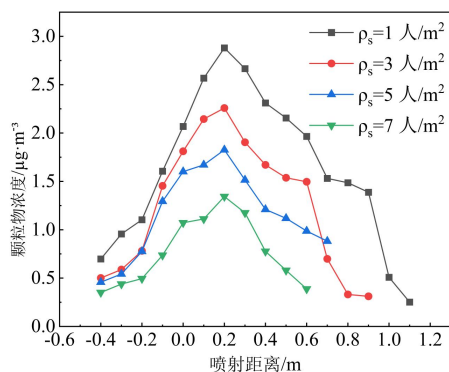
图 8 为不同传播时间下飞沫颗粒物浓度。图 8 (a) 为飞沫初始喷射时不同高度下颗粒物平均浓度, 可以看出, 粒子喷射瞬时的颗粒物浓度最大, 最高达到 $6.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, 之后浓度快速降低到 $0\sim 1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。颗粒物影响严重的范围是污染源前 0.2m 范围内 ($Z=10.9\text{m}$ 至 $Z=10.7\text{m}$ 区), 在 $Z=10.7\text{m}$ 后仅存在微量颗粒, 在 $Y=1.2\text{m}$ 和 $Y=1.5\text{m}$ 高度区的浓度高于其他高度区, 此高度区站姿乘客和坐姿乘客最易吸入带病毒颗粒, 所以身处污染源近距离周边的乘客受影响的几率最大。

图 8 (b) 为飞沫传播 20s 时不同立席密度下沉积的颗粒物浓度, 飞沫粒子受到重力作用, 沉积于车厢低处, 感染源位于 $Z=10.9\text{m}$ 处, 颗粒喷射方向为沿 Z 轴负方向, 由于回风口负压气流作用, 一部分颗粒物传播到污染源身后即 $Z=10.9\sim 11.3\text{m}$ 范围。可以看到, 立席密度为 $1\text{人}/\text{m}^2$ 时传播至 $Z=9.8\text{m}$ 处, $3\text{人}/\text{m}^2$ 时传播至 $Z=10\text{m}$ 处, $5\text{人}/\text{m}^2$ 时传播至 $Z=10.2\text{m}$ 处, $7\text{人}/\text{m}^2$ 时传播至 $Z=10.3\text{m}$ 处, 即随着立席密度的增大, 飞沫颗粒的传播范围减小了

0.5m , 结合图 7 的飞沫传播范围内人数可知, 传播范围内的乘客数量增加了 16 人, 易被感染的乘客增多。且随着立席密度的增大, 沉积的粒子数越少, 立席密度为 $1\text{人}/\text{m}^2$ 时平均沉降浓度为 $1.635\mu\text{g}/\text{m}^3$, 立席密度为 $7\text{人}/\text{m}^2$ 时沉积粒子浓度仅 $0.77\mu\text{g}/\text{m}^3$, 沉积的粒子数减少了 52.9%, 即附着在人体表面的粒子数越多, 乘客受病毒感染的几率增大。



(a) 飞沫初始喷射时不同高度下颗粒物平均浓度



(b) 飞沫传播 20s 时不同立席密度下沉积的颗粒物浓度

图8 不同传播时间下飞沫颗粒物浓度

Fig.8 Droplet particle concentration in different states

5 结论

本文研究了不同立席密度下地铁车厢内气流特性和咳嗽释放飞沫病毒扩散规律,并辅以现场实测验证,结论如下:

(1) 将模拟结果与实测数据进行对比,结果平均相对误差不超过 6%,表明此模型能较好地反映车厢内气流特性,验证了模型的有效性。

(2) 立席密度增大导致风速垂直分层,头部以上风速达 0.4m/s,易产生吹风感与气流短路;温度随密度升高而上升,温差增大但增幅减缓;CO₂ 浓度随高度与密度增加而上升,且因空气流通受限,呈现明显浓度分层现象。

(3) 飞沫病毒颗粒主要沿着咳嗽射流方向进行传播。立席密度为 1、3 人/m² 时病毒颗粒的扩散受气流影响较明显,随着气流在空气中停留时间延长,乘客周围浓度升高,传播范围更广;拥挤时期(立席密度为 5、7 人/m²)病毒颗粒物主要存在形式是沉积在周围乘客身上,传播范围略有减小,但污染范围乘客数量增多,污染源周围乘客容易被感染。

参考文献:

- [1] GONG Y, WEI Y, CHENG J, et al. Health risk assessment and personal exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in metro carriages-A case study in Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2017,574:1432-1438.
- [2] KIM J B, KIM S, LEE G J, et al. Status of PM in Seoul

metropolitan subway cabins and effectiveness of subway cabin air purifier (SCAP)[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2014,16(6):1193-1200.

- [3] 罗紫冰,陈玮玮,李鑫郡,等.地铁车厢热环境下乘员热舒适及人体温度影响因素研究[J].南京师范大学学报(工程技术版),2023,23(3):1-8.
- [4] 张育惠.冬夏季节地铁出行者热舒适需求及关键影响因素研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [5] 李福韩,张登春.地铁车厢内不同客流量的热环境特性及变化规律[J].铁道科学与工程学报,2021,18(6):1546-1554.
- [6] WU F, YU C, XU R, et al. Numerical simulation of droplet dispersion and passenger infection risk assessment in a subway carriage[J]. Applied Sciences, 2024,14(2):590.
- [7] GE P, FANG L. Effect of an accelerating metro cabin on the diffusion of cough droplets[J]. Scientific Reports, 2024,14(1):14150.
- [8] WU X, LING R, WAN X, et al. Study on the Impact of ventilation methods on droplet nuclei transmission in subway carriages[J]. Applied Sciences, 2025,15(9):4919.
- [9] LI C, WANG H, LI G, et al. Hazardous VOCs pollution and health effects in metro carriages in different building climate zones:A comparative study in China[J]. Building and Environment, 2025:113115.
- [10] 许俊,廖云丹,何晓平,等.华南某城市地铁车厢热环境与空气品质调研分析[J].制冷,2021,40(4):24-29.
- [11] 王新伟.高原城市轨道交通车内 CO₂ 污染与通风优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [12] WEI Jianjian, LI Yuguo. Airborne spread of infectious agents in the indoor environment[J]. American Journal of Infection Control, 2016,44(9):102-108.
- [13] DBOUK T, DRIKAKIS D. On coughing and airborne droplet transmission to humans[J]. Physics of Fluids, 2020,32(5):053310.
- [14] TELLIER R. Review of aerosol transmission of influenza A virus[J]. Emerging Infectious Diseases, 2006,12(11):1657-1662.
- [15] WELLS W F. Airborne Contagion and Air Hygiene[M]. Cambridge University Press, 1955.
- [16] 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.
- [17] 李恒奎,梁习锋,王中钢,等.地铁车厢车门开闭方式对飞沫传播影响[J].铁道科学与工程学报,2025,22(10):4687-4696.
- [18] 陈岫.地铁车厢内气流组织对污染物传播规律的模拟研究[J].暖通空调,2024,54(S2):392-399.
- [19] 伍钺,余超,徐任泽,等.基于病毒传播风险的地铁车厢通风系统优化研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(6):2241-2251.
- [20] 薛宇,叶蔚,张旭.地铁车厢内病原体佩戴口罩对飞沫病毒传播抑制效果的模拟研究[J].建筑科学,2020,36(10):114-118.
- [21] 戴文婷.铁路客运站候车厅病毒飞沫液滴传播研究[J].暖通空调,2024,54(4):94-99.
- [22] 高凡凡,康潮海.有限空间内飞沫传播影响因素分析[J].中国科技信息,2025,(4):49-53.
- [23] 张玉成,张登春.基于人体热舒适性的地铁车厢内变风量控制[J].铁道科学与工程学报,2023,20(12):4732-4743.
- [24] 伍钺,胡长林,徐任泽,等.高速列车客室飞沫传播规律及通风控制策略[J].铁道科学与工程学报,2024,21(12):4872-4884.
- [25] GB 50157-2013,地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [26] 李福韩.地铁车厢内不同立席密度的热环境特性及变化规律[D].湘潭:湖南科技大学,2021.
- [27] MARK N, W W N, ALAN H. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens[J]. Journal of occupational and environmental hygiene, 2005,2(3):143-154.
- [28] LI X, SHANG Y, YAN Y, et al. Modelling of evaporation of cough droplets in inhomogeneous humidity fields using the multi-component Eulerian-Lagrangian approach[J]. Building and Environment, 2018,128:68-76.
- [29] LIU L, WEI J, LI Y, et al. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing[J]. Indoor Air, 2017,27(1):179-190.