

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-170-09

上海冬季高校学生宿舍自然通风策略研究与分析

莫景然 刘春元 刘东旭 徐展飞 卢彩苗 肖 伟

(上海应用技术大学城市建设与安全工程学院 上海 201418)

【摘 要】 随着非典型肺炎 (SARS)、甲型 H1N1 流感、新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 等呼吸道传染病在全球各地相继爆发, 高校宿舍作为流动性大和人员密度高的场所, 病毒在人际间的传播也成为关注的热点。为调查学生的通风行为对舒适度和患病情况的影响, 对上海某高校学生冬季宿舍通风行为进行走访和问卷, 将通风行为和患病情况进行相关性分析, 并在此基础上模拟不同换气次数下的宿舍气溶胶分布, 分析学生的接触风险。结果显示, 72.6% 的学生采用开窗通风的方式, 将通风行为与受访者罹患感冒的频率进行分析, 发现自然通风行为与患病情况存在一定的显著相关性, 学生处于长时间不通风的环境更容易罹患感冒; 换气次数为 3 次/h 和 6 次/h 时, 气溶胶颗粒容易落在下铺学生身上, 换气次数为 9 次/h 时, 宿舍气溶胶浓度更低, 分布更均匀。

【关键词】 高校宿舍; 问卷调查; 相关性分析; 数值模拟

中图分类号 TU834.1 文献标志码 A

Research and Numerical Analysis of Natural Ventilation Strategies in Winter for University Student Dormitories in Shanghai

Mo Jingran Liu Chunyuan Liu Dongxu Xu Zhanfei Lu Caimiao Xiao Wei

(The College of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai, 201418)

【Abstract】 With the global outbreaks of respiratory infectious diseases such as SARS, H1N1, and COVID-19, the transmission of viruses in high-mobility and densely populated spaces like university dormitories has become a significant concern. This study investigates the impact of students' ventilation behavior on comfort and illness in a winter setting. Through on-site visits and questionnaires conducted at a Shanghai university, the correlation between ventilation practices and illness frequencies is analyzed. Furthermore, the study simulates dormitory aerosol distribution under different ventilation frequencies to assess students' exposure risks. The results reveal that 72.6% of students prefer window ventilation. Correlation analysis between ventilation practices and the frequency of flu contraction indicates a significant association, suggesting that students in inadequately ventilated environments are more susceptible to illness. Aerosol particles tend to settle on students in lower bunks at ventilation frequencies of 3times/h and 6times/h, while a ventilation frequency of 9times/h leads to lower aerosol concentrations and a more even distribution in the dormitory. This research provides insights into effective ventilation strategies for mitigating airborne transmission risks in university dormitories, particularly during the winter months.

【Keywords】 University Student Dormitories; Questionnaire Survey; Correlation Analysis; Numerical Simulation

0 引言

现代人约有 90% 的时间是在建筑室内度过的, 成年人平均每天吸入的室内空气约 16000L^[1]。呼吸

道传染疾病主要的传播途径包括呼吸道飞沫传播和接触传播, 而在相对密闭的环境中也可通过气溶胶传播^[2]。我国高等教育毛入学率达到了 54.4%^[3]。

作者简介: 莫景然 (2000-), 男, 硕士, E-mail: 2201242491@qq.com

通讯作者: 刘春元 (1976-), 女, 博士, 副教授, E-mail: chunyuanyuanliu@sit.edu.cn

收稿日期: 2024-03-05

高校宿舍居住密度大、室内学生接触频繁、环境潮湿,因此也成为呼吸道传染病聚集性感染的高风险场所。健康学生持续暴露在此环境下,极大增加了吸入气溶胶的风险,直接影响学生的生活质量和身心健康。

有调查^[4]表明 60% 的大学生每天在宿舍的时长在 10 小时以上, 44% 的大学生每天在宿舍的时长超过 12 小时, 更有 20% 左右的同学日均达到 14 小时以上。较长的在寝时间将成为学生患病的潜在因素。王攀^[5]利用 SPSS 数据分析软件对宿舍通风量与学生患感冒情况进行相关性分析, 结果发现, 人均通风量越低的宿舍, 学生患流行性感冒的比例越高, 持续时间也越长。在传统通风方式中, 机械通风速度达到 2m/s 时排污效率最佳, 为 92%^[6], 采用自然通风时, 窗户开启 7cm 时能够有效排出室内污染物^[7]。于丹^[8]等人对北京某高校学生宿舍空气中的微生物气溶胶浓度进行测试, 结果发现在 9:00 时空气中的微生物气溶胶含量明显高于 18:00, 分析原因是部分学生会选择夜晚紧闭门窗, 室内通风不良, 学生呼吸产生的气溶胶不断累计导致。

本文采用问卷调查的方法对上海市某高校学生宿舍进行现场调研, 将调研结果录入数据分析软件 origin 中进行选项频率统计, 并使用卡方检验法研究宿舍自然通风与学生舒适性、学生患感冒情况是否存在相关性。并用 Fluent 软件对宿舍不同换气次数下的宿舍气溶胶分布特性进行模拟, 为找到控制气溶胶传播的最佳通风方式提供建议。

1 研究方法

1.1 问卷设计

为了解学生冬季在宿舍的通风习惯及对宿舍环境的主观感受, 采用走访和问卷的方式进行调研, 并将调研结果录入数据分析软件 Origin 中进行选项频率统计。同时, 使用卡方检验法对宿舍自然通风与学生舒适性、学生患感冒情况是否存在相关性进行了研究。

1.2 问卷概况

考虑到学生对于宿舍环境的主观感受和对病毒的抵抗能力存在差别, 为了研究学生的通风习惯和热舒适以及患病机率之间的相关性, 将采用卡方检验法进行相关性分析。此外, 根据受访者的在寝时长和健康状况等基本信息, 可以进一步得出不同

人员密度对室内空气品质的影响。了解学生冬季的通风习惯、动机和期望, 有助于在宿舍建设和改造的过程中提供参考。在宿舍冬季通风策略方面, 保证学生舒适的前提下, 提高室内空气品质。

基于上述考虑, 问卷的主要内容主要包括以下 4 个方面: 第一部分收集学生的基本个人信息; 第二部分调查学生对宿舍室内环境的主观感受; 第三部分调查宿舍学生的通风行为习惯; 第四部分是学生身体健康状况调查。具体内容如表 1 所示。

表 1 问卷内容

Table 1 Questionnaire content

类型	相关内容
基本信息	性别、年龄、宿舍常驻人数、在寝时长
对宿舍环境主观感受	热感觉、空气质量满意程度、异味接受度
通风习惯	通风动机、策略、频率和时长
健康状况	患病史、患病症状、患病频率

本问卷调查在 2022 年 11-12 月和 2023 年 2-3 月对上海市某高校在读学生进行了问卷调研, 调查对象包括在校本科生和硕士生, 年龄跨度为 17-28 岁。最终共调查 8 栋宿舍楼, 涉及 163 间宿舍, 累计发放问卷数量 439 份, 回收问卷数量 424 份, 有效问卷数量 405 份, 问卷的有效率即有效问卷数占回收问卷数的比值为 95.5%。

1.3 数据分析

本文使用数据统计分析软件 origin 将 405 份有效调查问卷录入, 研究内容包括频数分析和卡方检验。主要针对两个分类变量的交叉表进行卡方独立性检验, 步骤如下:

第一步: 提出原假设。原假设表示两个类别的变量之间不存在关联性, 即它们之间的差异是由随机因素引起的。

第二步: 计算卡方值。根据观察值和期望值计算出卡方值, 计算公式如式 (1)。

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} \quad (1)$$

其中: f_o 是某个类别的观测值; f_e 是期望值, f_e 的计算公式如式 (2) 所示; f_o 与 f_e 的差值称为残差; χ^2 是卡方值, χ^2 值越大说明观测值与期望值的差别越大, 即远离原假设。

$$f_e = \frac{f_r f_c}{n} \quad (2)$$

其中： f_r 是该类别所在行的频次之和； f_c 是该类别所在列的频次之和； n 是所有类别的总频次。

第三步：获得卡方临界值。通过 origin 软件获得卡方临界值，卡方临界值由两个因素决定，一个是显著性系数 α ，一般设定为 0.05；另一个是自由度 df ，计算公式如式（3）。

$$df = (R-1)(C-1) \quad (3)$$

其中： R 是行数； C 是列数。

第四步：作判定。若计算出的卡方值大于卡方临界值，则拒绝原假设，认为两个类别的变量之间存在关联性，否则接受原假设，认为两个类别变量相互独立。

本文主要针对两个分类变量的交叉表进行相关性分析，并进一步计算出关联程度的指标 P ，如果 P 值小于预设的显著性系数 α （本文 α 取 0.05）时，拒绝原假设，认为两个变量是相关的[5]。

2 问卷调查结果

2.1 受访者基本信息

本次回收到的有效问卷 405 份，涉及到男性 208 人，女性 197 人，男女比例趋于 1:1；涉及本科生 274 人，研究生 131 人，比例趋于 3:2；问卷样本具有普遍性。

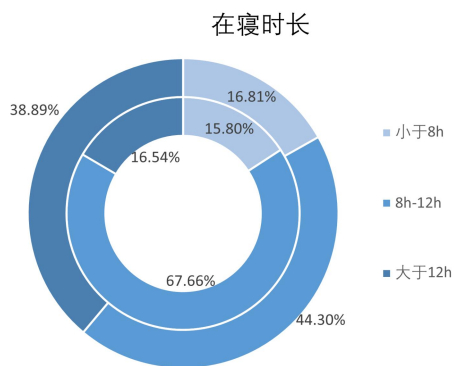


图1 受访学生在寝时长

Fig.1 Duration of time spent in dormitories among surveyed students

图1是对受访学生工作日和周末在寝时间的采集结果，周一至周五的在寝时间有 274 人（67.66%）为 8-12 小时，67 人（16.54%）超过 12 小时。受访者周末的在寝时间为 8-12 小时的人数有 179 人（44.30%），大于 12 小时的人数达到 158 人（38.89%）。超过 80% 的大学生每天停留在宿舍的时间较长，普遍在 8 小时以上。

2.2 宿舍热舒适评价

图2为受访学生对宿舍室内舒适度评价的调查反馈结果，舒适度的评价分为七级，被调查的 405 名学生中共有 82 名（20.2%）学生认为宿舍环境是不舒适的，其中 39 名（9.6%）学生选择了“稍微不舒适”，27 名（6.7%）学生主观评价为“不舒适”，16 名（4%）学生为“极不舒适”，149 名（36.8%）学生主观评价为“比较舒适”，所占比例最高。由此可见，在冬季，学生对于室内热环境的感觉并不理想，需采取适当方法改善宿舍热环境。

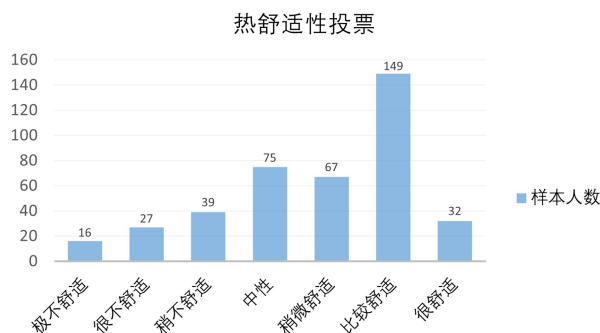


图2 宿舍热舒适性投票

Fig.2 Dormitory thermal comfort voting

将宿舍自然通风和宿舍环境舒适性评价进行相关性分析，将宿舍通风情况归类为通风与不通风，将宿舍舒适性的评价分为不舒适、中性和舒适，得出宿舍自然通风与室内环境舒适度评价交叉表，如表2所示。在宿舍不通风的 29 名学生中有 12 名学生（41.4%）认为宿舍环境不舒适，8 名学生（27.6%）认为宿舍环境是中性的，9 名学生（31%）认为舒适。宿舍通风的 376 名学生中 70 名学生（18.6%）认为宿舍环境不舒适，67 名学生（17.8%）认为宿舍环境是中性的，239 名学生（63.6%）认为宿舍环境舒适。

表2 宿舍自然通风与室内环境舒适度评价交叉表

Table 2 Cross-table of dormitory natural ventilation and indoor environmental comfort evaluation

冬季宿舍通风情况		舒适度评价			总计
		不舒适	中性	舒适	
不通风	观测值	12	8	9	29
	期望值	5.87	5.37	17.76	29
通风	观测值	70	67	239	376
	期望值	76.13	69.63	230.24	376
总计		82	75	248	405

对宿舍是否通风与室内环境舒适度进行卡方检验, 分析结果如表 3 所示。结果表明, 皮尔逊卡方值为 12.929, 渐进显著性 $P=0.00156<0.05$, 说明宿舍自然通风与室内学生对于宿舍舒适度的评价之间存在显著的相关性, 相比于不通风的宿舍, 选择宿舍自然通风的学生有更高比例认为宿舍是舒适的^[9]。

表 3 宿舍自然通风与室内环境舒适度的卡方检验结果

Table 3 Chi-square test results for dormitory natural ventilation and indoor environmental comfort

参数	数值	自由度	渐进显著性 P
皮尔逊卡方	12.929 ²	1	0.00156
似然比	12.235	1	0.0022
有效个案数	405	——	——

2.3 宿舍空气品质评价及影响因素

在图 3 中, 被调查的 405 名学生中有近一半的受访者认为宿舍空气品质不尽如人意, 其中 167 人 (41.23%) 对宿舍空气品质感到一般, 29 人 (7.16%)、10 人 (2.47%) 分别感到不满意和很不满意。造成宿舍空气品质不良的因素是多方面的, 受访者主观感受认为宿舍通风不良和人员密度过大是造成室内空气品质不良的主要原因, 从图 4 可以看出这两项分别有 124 人和 114 人选择, 另外有 95 人指出宿舍存在异味, 77 人则觉得室内空气品质不良是灰尘过多所导致。

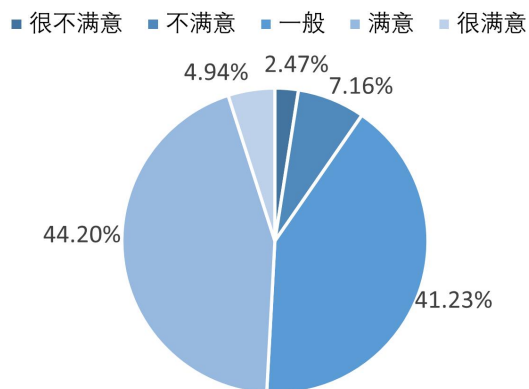


图 3 宿舍空气品质满意度频率分布图

Fig.3 Frequency distribution of dormitory air quality satisfaction

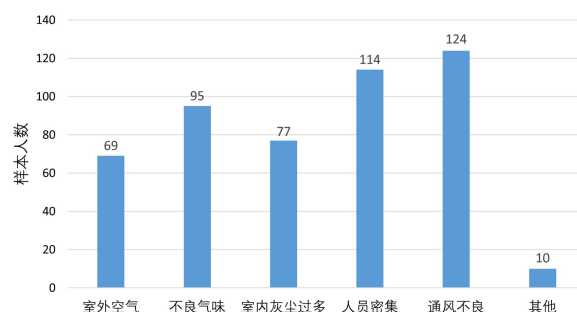


图 4 室内空气品质影响因素

Fig.4 Factors influencing indoor air quality

宿舍内的异味包括: 宿舍垃圾和食物引起的不新鲜的气味、卫生间或室外传入的刺激性气味、发霉的气味、人体或烟草产生的不良气味等。图 5 给出了受访者对室内是否存在异味的回答统计, 经常或者有时候感知到宿舍内存在异味的受访者占比为 60.2%, 其中 34.8% 的学生认为宿舍存在影响较小的轻微异味; 有 16% 的学生感觉宿舍有中等异味; 有 9.4% 的学生则认为宿舍存在强烈异味, 且影响较大。对这部分受访者追加询问原因, 有 26% 认为宿舍异味来源于宿舍垃圾, 22% 觉得异味来源于卫生间, 另有 25% 认为是食物气味, 8% 认为是室外异味传入室内, 其他导致宿舍内出现异味的原因包括宿舍通风不畅、室内人员密集、宿舍卫生环境差等。

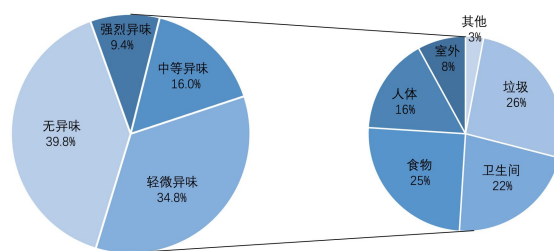


图 5 宿舍异味统计及分布

Fig.5 Statistics and distribution of dormitory odors

2.4 学生通风习惯统计及分析

2.4.1 通风行为统计

405 名受访者中有 29 人 (占 7.16%) 所在宿舍在冬季基本不通风, 对剩余 376 人进行开窗通风行为习惯调查, 图 6 是学生通风行为习惯频率分布图, 有 273 人 (占 72.6%) 会选择开窗通风, 所占比例最高; 31 人 (占 8.2%) 会选择开门通风, 占比最低; 另外有 72 人 (19.2%) 会同时开启门和窗

进行通风。对有通风意愿的 376 名学生所在宿舍通风面积的情况调查,有 17.0%学生会将门窗打开约手指宽度的缝隙;41.8%学生选择开大约手掌宽度的缝隙,所占比例最高;21.5%学生会将门窗开一半通风;12.0%学生会选择开一半以上;把门窗全部打开通风会导致冷空气进风量过大,因此选择全部开启的学生较少,仅有 7.7%,占比最低。虽然宿舍人员密度偏大,但是大多数学生会去改善室内空气质量,将门窗适当开一点缝隙是可采取的最简单有效的措施。

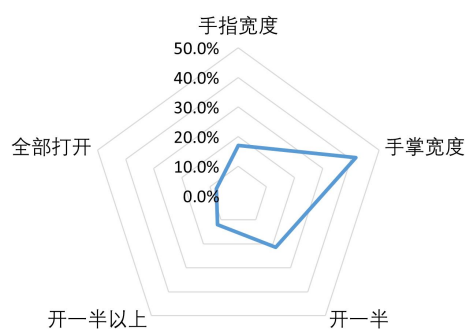


图 6 学生通风策略统计

Fig.6 Statistics on student ventilation strategies

2.4.2 学生通风频率统计

图 7 对 376 名有通风习惯的学生通风时间段的调查统计,有 163 名学生(43.35%)会在 12:00-17:00 进行室内通风,分析原因是下午的室外气温为一天中最高;有 117 名学生(31.12%)倾向在上午 7:30-12:00 进行通风,分析原因是经过一夜后室内二氧化碳污染物积聚;选择 17:00-22:00 和 22:00-7:30 进行室内通风的学生为 77 名(20.48%)和 19 名(5.05%),分析原因是从傍晚开始室外气温逐渐降低,因此只有少数学生选择在这两个时段进行通风。

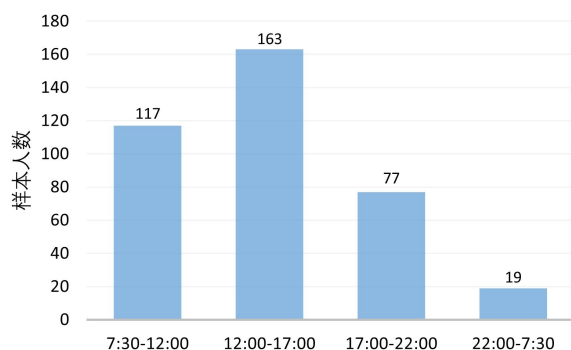


图 7 学生通风时段分布图

Fig.7 Distribution of student ventilation time periods

对 376 名有通风习惯的学生通风时长的调查统计,其中 97 人(23.95%)所在宿舍每天通风时长在 1 小时以内;172 人所在宿舍平均每天通风时长在 1-3 小时,所占比例最高,达到 42.47%;67 人(16.54%)所在宿舍通风时长为 3-6 小时;40 人所在宿舍每天通风时长超过 6 小时,占比 9.88%。宿舍通风时长越短,认为宿舍存在异味的学生所占比例就越高,因此经常通风是降低宿舍异味的有效途径。

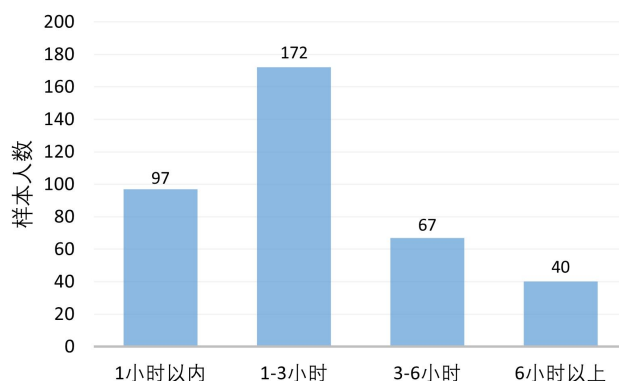


图 8 学生通风时长统计

Fig.8 Statistics on student ventilation duration

2.5 学生身体健康状况调查

本文针对 405 名受访学生冬季患感冒次数作了调查,结果如图 9 所示,可以看出 273 名学生(67.4%)冬季在室内没有患过感冒;97 名学生(24%)冬季感冒 1-2 次,28 名学生(6.9%)冬季感冒 3-4 次,另外 7 名学生(1.7%)冬季感冒 4 次以上。

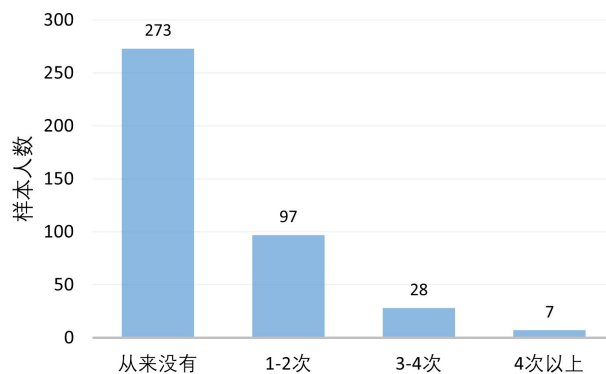


图 9 学生感冒频率分布

Fig.9 Frequency distribution of student cold incidence

应用 origin 软件制作宿舍自然通风和学生患感冒情况交叉表,从表 4 中发现冬季不通风的宿舍有 18 名学生患过感冒,占比 62.1%,通风的宿舍没有

患过感冒的学生有 262 名, 占比 69.7%, 初步预测宿舍自然通风行为与学生患感冒存在一定的相关性。

表 4 宿舍自然通风和学生患感冒频率交叉表

Table 4 Cross-table of dormitory natural ventilation and student cold incidence frequency

冬季宿舍通风情况		学生患感冒情况		总计
		没有患过	患过	
不通风	观测值	11	18	29
	期望值	19.55	9.45	29
通风	观测值	262	114	376
	期望值	253.45	122.55	376
总计		273	132	405

结果如表 5 所示, 皮尔逊卡方值为 12.353, 渐进显著性 $P=0.00044<0.05$, 说明宿舍自然通风与在室学生患感冒情况之间存在显著的相关性, 学生处于长时间不通风的宿舍更容易患感冒。

表 5 宿舍自然通风与学生患感冒情况的卡方检验

Table 5 Chi-square test for dormitory natural ventilation and student cold incidence

参数	数值	自由度	渐进显著性 P
皮尔逊卡方	12.353 ²	1	0.00044
似然比	11.436	1	0.00072
连续性校正	10.951	1	0.00094
有效个案数	405	——	——

3 数值模拟

3.1 建立宿舍模型

以上海市某高校学生宿舍为研究对象, 根据实测结果, 使用 Spaceclaim 软件绘制如图所示的宿舍物理模型。房间尺寸为 3 (X) × 5 (Y) × 3 (Z) m, 房间体积为 45m³。学生身高假定为 1.7m, 将人体头部简化为正方体, 躯干简化为长方体^[10]。宿舍内有 4 张上下铺床, 床上各躺着 1 名学生, 假定只有室内中心呈站立状态的学生为传染源, 其余学生均处于健康状态。传染源口部简化为矩形出口。宿舍三维模型及各学生标记如图 10 所示。

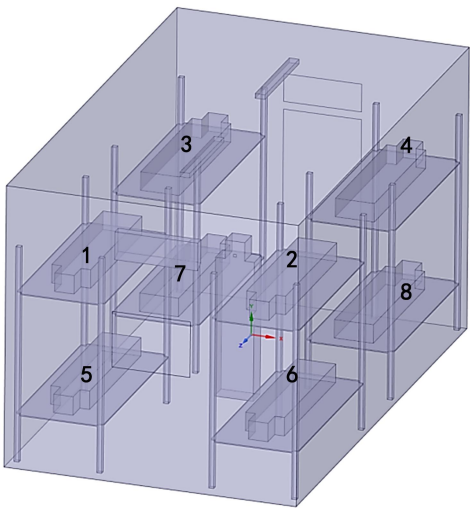


图 10 宿舍三维模型

Fig.10 Dormitory Three-Dimensional Model

3.2 控制方程

在数值分析过程中做出如下假设: (1) 连续相符合气体状态方程的等压流动^[11]且常温、低速、不可压; (2) 忽略空气与墙壁等接触面之间的摩擦; (3) 使用 Boussinesq 假设来处理由于竖直温度梯度引起的浮升力; (4) 人体呼出的气溶胶颗粒简化为水液滴, 忽略非挥发性固体成分, 忽略咳嗽气溶胶中病菌的存活和衰减特性^[12]以及气溶胶颗粒间的凝聚和破碎现象^[13]。

基本控制方程如式 (4) 所示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (4)$$

其中: ρ 为流体密度, kg/m³; ϕ 为通用变量; t 为时间, s; div 表示散度; u 为速度矢量; Γ 为广义扩散系数; grad 表示梯度; S 为广义源项。在连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分运输方程中, ϕ 、 Γ 和 S 定义如表 6 所示。

表 6 控制方程中各符号的具体形式

Table 6 The Specific form of Each Symbol in the Control

Equation			
方程	ϕ	Γ	S
连续性方程	1	0	0
动量守恒方程	u_i	μ	$\frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i$
能量守恒方程	T	K/c	S_T
组分质量守恒方程	c_s	$D_s\rho$	S_s

3.3 飞沫扩散模型验证

Liu^[14]等人建立咳嗽飞沫液滴核的理论模型,计算出人体咳嗽产生的飞沫液滴所能扩散的距离。室内环境温度为 20℃,相对湿度为 0%,不考虑室内通风和人体发热。模拟初始粒径为 20μm 的飞沫颗粒以 10m/s 的速度从人体口部喷出。本文建立宿舍内单人模型,如图 11 所示,房间尺寸与人体尺寸与 3.1 节相同,忽略室内其他布置物的影响。结果对比如图 12 所示。

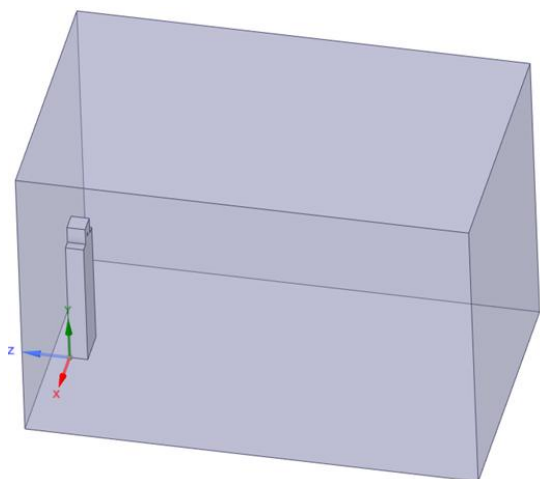


图 11 宿舍单人模型

Fig.11 Dormitory Single Model

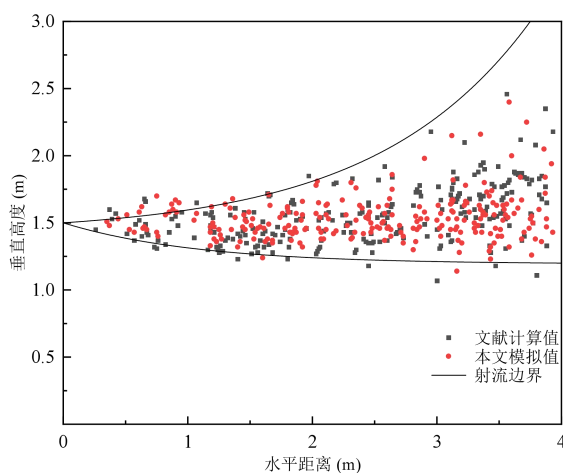


图 12 飞沫扩散模型验证

Fig.12 Verification of Droplet Diffusion Model

结果显示,仿真模拟结果与文献计算结果较为接近,可以较好地预测大部分飞沫颗粒的扩散距离,绝大多数颗粒处于咳嗽射流边界中,仅个别颗粒存在一定偏差,误差是由于受室内湍流影响,气溶胶颗粒的运动过程具有随机性,但在可接受范围

内。因此可认为模拟结果基本可靠,从而验证了本文构建的飞沫扩散模型的合理性。

3.4 边界条件

3.4.1 连续相边界条件

(1) 入口边界条件:进风口选用速度入口边界,根据问卷调查结果,设置外窗开度为 150mm×600mm,约手掌宽度。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[15]要求,公共建筑内人均新风量需保证至少 30m³/h,结合本文模型,三种换气次数设置为 3、6、9 次/h,对应的进风速度分别为 0.42m/s, 0.83m/s, 1.25m/s,进风温度设定为 4.2℃,进风气流方向垂直于进风口平面。

(2) 出口边界条件:出风口采用压力出口边界,出口压力为 0Pa^[16]。

(3) 壁面边界条件:人体表面热流密度取 23.8W/m²^[17];节能灯具表面热流密度为 100W/m²。其余表面包括室内四周墙壁、天花板、地面、床、门窗、壁挂式空调,均设置为静止、无滑移的绝热壁面。

3.4.2 离散项边界条件

(1) 使用 UDF (用户自定义函数) 来定义人体咳嗽的初始速度,人体咳嗽产生脉冲射流,在 0.12s 左右出现最大射流速度约为 9m/s,一次咳嗽的持续时间约为 0.4s。将咳嗽速度拟合合成如式(5)、(6)所示的从 0 至 0.12s 的曲线方程和从 0.12s 至 0.4s 的曲线方程。

$$y = -625x^2 + 150x \quad (5)$$

$$y = 87x^2 - 70x + 16 \quad (6)$$

(2) 颗粒沿垂直于人体口部的方向喷出,咳嗽射流的温度设为 33℃^[18],咳嗽射流的水蒸气质量分数设为 0.0372^[19],水的质量分数设为 91.5%^[20]

3.5 网格无关性验证

计算域的采用适应性较好的多面体网格,网格数量分别为 78.4 万、103.8 万、123.7 万、167.2 万。在宿舍室内中心位置沿 y 方向设置一条气流速度测线,读取该线上的速度分布如图 13 所示,123.7 万和 167.2 万网格条件下的速度分布较为类似,选择 123.7 万的网格进行仿真。

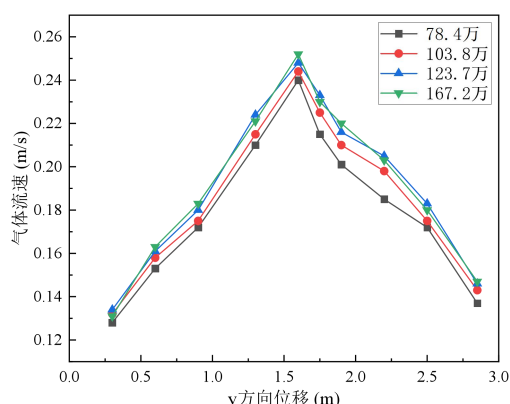


图 13 网格无关性验证结果

Fig.13 Grid Independence Verification Diagram

3.6 结果及分析

三种换气次数下,将传染源咳嗽一次释放的气溶胶颗粒数量作为总颗粒数量,8个位置学生120s后捕获的气溶胶颗粒数与之的比值定义为捕获率,以此来评价各个位置学生的接触风险。

图14为结果对比,从结果可见,当换气次数为3次/h时,5号学生的的气溶胶捕获率最大,3号学生最低。当换气次数为6次/h时,6号学生的的气溶胶捕获率最大,3号学生最低。当换气次数为9次/h时,6号学生的的气溶胶捕获率最大,3号学生最低。整体来看,换气次数为3次/h和6次/h时,落在下铺学生表面的气溶胶颗粒数量大于上铺学生,当换气次数为9次/h时,相比前两种工况,落在各个位置学生表面的颗粒数量更为均匀。

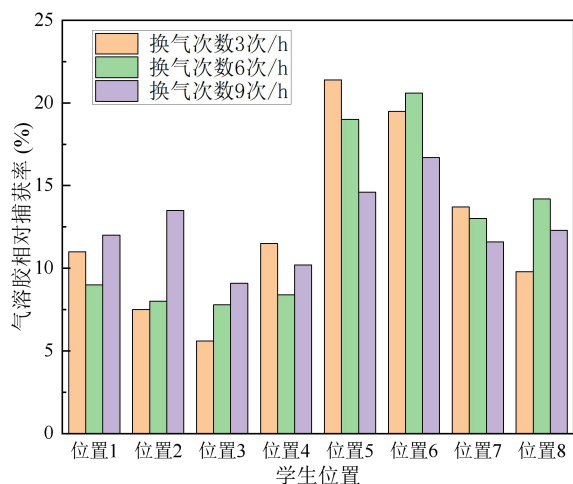


图 14 不同位置学生气溶胶捕获率

Fig.14 Aerosol Capture Rates of Students at Different Locations

4 结语

针对上海某高校学生宿舍进行了宿舍室内环境和人员通风习惯调查问卷调研,利用卡方检验法对宿舍自然通风与室内环境舒适度、宿舍自然通风与学生患感冒情况做了非数值量相关性分析,并通过Fluent软件对不同换气次数下的气溶胶分布进行模拟,分析不同位置学生的接触风险,结果表明:

(1) 冬季在宿舍进行通风的学生占比92.84%,担心冷空气进入是学生不通风的主要原因。72.6%的学生习惯打开窗户进行通风,对于通风面积,41.8%的学生习惯开大约手掌宽度的缝隙。对于通风时间段,43.35%的学生会选择12:00-17:00进行通风,31.12%的学生会选择7:30-12:00通风。在冬季,有半数的学生在宿舍有开空调的习惯。

(2) 使用卡方检验法对宿舍自然通风与室内学生舒适度做相关性分析,结果表明,室内自然通风与学生舒适度之间存在显著的相关性,相比于不通风的宿舍,自然通风宿舍内的学生有更高比例认为室内是舒适的;同时对宿舍自然通风与学生患感冒情况做相关性分析,发现自然通风与学生患感冒情况之间存在显著的相关性,学生长期处于不通风的宿舍更容易罹患感冒。

(3) 气溶胶颗粒呈非定常、非均匀的空间分布。增大换气次数后气溶胶在室内的扩散速度显著加快,接触壁面后折返气流的动量增大,气流发生下沉的位置逐渐后移。换气次数为3次/h和6次/h时,落在下铺学生表面的气溶胶颗粒数量大于上铺学生,当换气次数为9次/h时,落在各个位置学生表面的颗粒数量更为均匀。

参考文献:

- [1] 邓怡,段梦婕,郭建国,等.基于呼吸系统健康效应的室内空气微生物研究现状与展望[J].科学通报,2023,68(6):656-670.
- [2] 杨天龙,王瑶,赵泽宇,等.新疆维吾尔自治区新冠肺炎疫情 SEIAR 模型研究[J].中国卫生统计,2022,39(4):610-615.
- [3] 郭冉,田丰,王露瑶.量减质升:青年就业状况变化及分析(2006-2021)—基于CSS的调查数据[J].中国青年研究,2022(11):110-119,78.
- [4] 夏清文,欧阳国辉.大学生宿舍生均建设面积指标的时

- 代合理性探讨[J].中外建筑,2020(3):64-68.
- [5] 王攀.宿舍通风量与传染性呼吸道疾病空气传播机理的研究[D].天津:天津大学,2018.
- [6] 徐彤.基于 Fluent 软件的北方高校宿舍室内空气品质控制研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.
- [7] 刘蓬博.西安市采暖季宿舍室内空气环境调研与优化分析[D].西安:西安理工大学,2019.
- [8] 于丹,蔡志斌,王丽娜,等.北京地区冬季高校宿舍空气微生物浓度和粒径分布特征[J].建筑科学,2020,36(2):56-60,103.
- [9] 李壮壮.冬季北方高校宿舍自然通风开窗对室内环境影响的研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
- [10] 杨亚锋,汪怡平,陈志鑫,等.大巴车飞沫扩散特性及乘客感染风险预测[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(1):161-167.
- [11] 张亿先.空调房间飞沫气溶胶颗粒运动规律研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.
- [12] 苗露.电梯轿厢内气溶胶传播特性研究及通风方案优化[D].济南:山东建筑大学,2023.
- [13] 韩龙娜.基于风冷冷凝器喷雾降温装置的实验研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- [14] L L, J W, Y L, et al. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing[J]. Indoor air, 2017,27(1).
- [15] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] 张喜清,王亚龙,孙世成.基于 PMV-PPD 的车室内正压评价与研究[J].中国工程机械学报,2021,19(6):500-505.
- [17] 廖悦.高海拔地区供暖病房飞沫污染物的传播及风险评估[D].重庆:重庆大学,2018.
- [18] 李博轩.民机客舱内呼吸道病原体液滴扩散的数值仿真分析[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2023.
- [19] 曾凯磊,陈燕,谭堰琴,等.风速对自然通风教室内咳嗽飞沫液滴扩散的影响[J].建筑热能通风空调,2022,41(6):7-11,44.
- [20] Nicas M, Nazaroff W W, Hubbard A. Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens[J]. J. occ. env. hyg, 2005,2(3):143-154.

(上接第 161 页)

- [6] Diao Y H, Liang L, Kang Y M, et al. Experimental study on the heat recovery characteristic of a heat exchanger based on a flat micro-heat pipe array for the ventilation of residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2017,152:448-457.
- [7] Zhu Z, Fan H, Zhang C. Experimental investigations on the effectiveness of micro heat pipe array heat exchanger for heat recovery for residential building[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,102:980-988.
- [8] Lim H, Kim C, Cho Y, et al. Energy saving potentials from the application of heat pipes on geothermal heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,126:1191-1198.
- [9] 谢福林,郭宪民,郭欣炜,等.翅片结构对换热器结霜特性影响的实验研究[J].制冷学报,2021,42(3):51-58.
- [10] Wu C, Wang Z, Li X, et al. Field experimental research on retarding frosting and improving defrosting performance of air source heat pumps through variable frequency technology[J]. Journal of Building Engineering, 2023,64:105628.
- [11] Wang F, Liang C-H, Yang M-T, et al. Preliminary study of a novel defrosting method for air source heat pumps based on superhydrophobic fin[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,90:136-144.
- [12] 李帅帅,李刚,张俊永,等.基于相变蓄能的辐射式高效空气源热泵系统研究[J].制冷技术,2022,42(2):32-38.