

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.159



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



热力效应下传染病医院污染物浓度变化试验研究

汪阔¹, 沈炼^{1,2}, 韩艳¹, 杨瑛³, 熊鹰¹, 艾正涛⁴

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410076; 2. 长沙学院 土木工程学院, 长沙 410022;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004; 4. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:与常规建筑不同, 传染病医院的建设需严格控制其周边风环境与污染物浓度, 而当前对其研究还极其匮乏。以长沙市某在建传染病医院为研究背景, 利用大尺寸风洞 10 m(宽)×3 m(高)对不同热力效应下医疗建筑风环境和污染物扩散进行了详细分析, 探究了建筑布局和植被对病区气态污染物扩散的影响。研究结论表明: 在 $-0.23 < Rb < 0$ 范围内, 热力效应对风廓线影响主要集中在竖向分量, 会较大程度影响流场分布的最大值; 病区内污染物浓度大小主要受风速影响, 当风速较大时, 污染物浓度与当地热力效应呈正比关系。而在低风速时, 污染物浓度与当地热力效应呈先增长后下降关系, 且在 $Rb = -0.16$ 时达到最大值; 改变建筑布局是改善污染物浓度的有效办法, 建筑朝向与主导风向一致时有利于污染物的扩散。植被增设在建筑回流区对污染物扩散具有一定促进作用, 增设在通风廊道则不利于污染物扩散。

关键词:风洞试验; 风环境; 污染物扩散; 热力效应; 传染病医院

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)04-0157-10

Experimental study on airborne pollutant diffusion in infectious disease hospital under thermal effect

WANG Kuo¹, SHEN Lian^{1,2}, HAN Yan¹, YANG Ying³, XIONG Ying¹, AI Zhengtao⁴

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, P. R. China;
2. School of Civil Engineering, Changsha College, Changsha 410022, P. R. China; 3. The Fifth Bureau of China State Construction Engineering Corporation, Changsha 410004, P. R. China; 4. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

收稿日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(51808059); 湖南省自然科学基金(2018JJ1027, 2019JJ50688); 长沙市杰出青年创新培育计划(kq195004); 湖南省教育厅优秀青年基金(19B054); 长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升项目(SJCX202016)

作者简介: 汪阔(1994-), 男, 主要从事建筑风环境与污染物扩散研究, E-mail: 1178226400@qq.com。

沈炼(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: shenlian.lcz@163.com。

Received: 2021-04-30

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(No. 51808059); Natural Science Foundation of Hunan Province(No. 2018JJ1027, 2019JJ50688); Changsha Outstanding Youth Innovation Cultivation Program(No. kq195004); Outstanding Youth Fund of Hunan Education Department(No. 19B054); Changsha University of Science and Technology Postgraduate Practical Innovation and Entrepreneurship Enhancement Project(No. SJCX202016)

Author brief: WANG Kuo (1994-), main research interests: building wind environment and pollutant diffusion, E-mail: 1178226400@qq.com.

SHEN Lian (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: shenlian.lcz@163.com.

Abstract: Compared with conventional buildings, Construction of infectious disease hospitals needs to strictly control the surrounding wind environment and pollutant concentration, but the current research is highly scarce. This paper takes an infectious disease hospital under construction in Changsha as the case study. The detailed analysis of wind environment and pollutant dispersion of medical buildings under different thermal effects was conducted by a 10 m (width) \times 3 m (height) wind tunnel test. In the process, building layout and vegetation are considered. The results show that in the range of $-0.23 < Rb < 0$, the wind profile influenced by the thermal effect is mainly concentrated in the vertical component. However, the thermal effect will greatly affect the maximum value of flow field distribution. The absolute values of pollutant concentration are affected primarily by wind speed. The pollutant concentration is positively proportional to the local thermal effect with high wind speeds. In contrast, at low wind speeds the pollutant concentration increases first and then decreases with the local thermal effect and reaches the maximum value when $Rb = -0.16$. Changing the layout of the building is an effective way to improve the concentration of pollutants. When the direction of the building is consistent with the prevailing wind direction, it is most conducive to the emission of pollutant. The addition of vegetation in the building reverse flow area can promote the diffusion of pollutants, while the greenery in the ventilation corridor will inhibit the spread of contaminants.

Keywords: wind tunnel test; wind environment; pollutant dispersion; thermal effect; hospital for infectious diseases

随着城市化进程的不断推进,由工业废气、城市热岛、气溶胶病毒等带来的环境问题愈显突出,经过数十年的发展,学者们对其进行了大量研究^[1-5],获取了许多宝贵结论。但现有研究对传染病医院的针对性分析还相对较少,作为疫情爆发后人员救治的主战场,目前,传染病医院周边风环境与污染物扩散机理还尚不明确,其研究成果还难以在被动层面支撑医院的设计与规划。因此,亟需对传染病医院周边风环境与气悬污染物展开研究,了解污染物随风扩散的迁移路径与浓度分布规律,为日后传染病医院的建设与规划提供理论支撑。

对建筑群污染物扩散的研究手段主要包括风洞试验、数值模拟和现场实测^[6-9]。如Liu等^[10]对荷兰园小区进行了现场试验研究,详细分析了温度对小区风环境的影响;Nardecchia等^[11]利用数值模拟方法研究了不同温差对建筑流场的影响;Xie^[12]研究了太阳辐射对城市街谷污染物扩散的影响;苗超等^[13]采用CFD技术对厂房工作区热环境及污染物浓度分布进行了分析。近年来,随着试验技术的快速发展,风环境风洞试验研究取得了重大进展,试验规模也从早期的单体建筑模型向实际小区模型过渡。如欧阳琰等^[14]采用环境风洞对城市小区的流场和污染物扩散进行了研究,发现污染物浓度分布主要受来流风速影响;Hajra等^[15-16]对面积为 1.8 m^2 的边界层风洞进行了试验,发现下游建筑高度是影响污染物扩散的关键参数;Gousseau等^[17]以加拿大蒙

特利尔某小区为研究背景,使用 1.8 m (宽) \times 1.8 m (高)的风洞详细分析了小区近地面污染物扩散规律;Liu等^[18]利用风洞试验对香港某典型建筑楼层进行了污染物扩散研究,分析了开窗对污染物扩散的影响;Zhang等^[19]以Liu等^[18]的试验对象为研究背景,获取了建筑物迎风面和背风面污染物扩散路径;Chao等^[20]也利用风洞试验研究了浮力对气体扩散的影响,指出了高浮力可有效减少建筑物背风侧污染物浓度。

当前研究对传染病医院的针对性分析还相对较少,特别是考虑热力条件下污染物扩散的试验研究还十分匮乏,其作用机理和流场分布尚不明确。以往研究主要是利用单一变量分析污染物浓度的扩散,对多因素作用下污染物浓度的影响分析及措施研究还未见其报道。笔者以长沙市某在建传染病医院为研究背景,在考虑热力效应后对建筑布局和植被影响下的传染病医院污染物浓度进行定量研究,揭示了污染物浓度分布规律,提出相关的浓度控制措施。

1 风洞试验

1.1 风洞简介

试验在长沙理工大学风工程与风环境研究中心进行,该风洞采用回/直流双试验段结构,包括水平回流高速试验段和直流低速试验段,如图1所示。其试验段尺寸为 21 m (长) \times 10 m (宽) \times 3 m (高),转盘直径为 5.0 m ,风速范围在 $1.0 \sim 18.0 \text{ m/s}$,安装了三维移测架,采用变角度风机叶片控制系统,确保低速风的稳定。

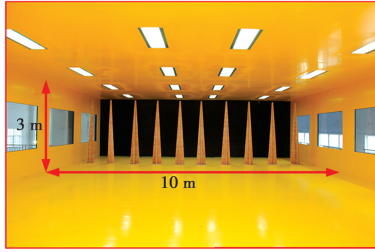


图 1 风洞实验室

Fig. 1 Wind tunnel laboratory

1.2 风速测量装置

水平方向采用欧文探针测量人行高度风场,如图 2(a)所示,A 端风速与 A、B 端的压差成正比关系。

$$u = a + b \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

式中: Δp 为探头两端的压差; a 、 b 为探头的标定系数; u 为 A 端的风速。

试验前对探针进行标定,采用眼镜蛇风速仪同步测量探头顶端风速,得到的标定拟合系数如图 2(b)所示,拟合系数均方根大于 0.99,说明风速与压差具有很好的线性关系。测试过程中采用 PSI DTC Initium 型电子压力扫描阀测量风压,频率 350 Hz,试验过程中采样时间为 1 min。风廓线测量采用眼镜蛇风速仪,该风速仪能够同时测量 u 、 v 、 w 3 个方向的风速,采样频率为 512 Hz,采样时间为 1 min。

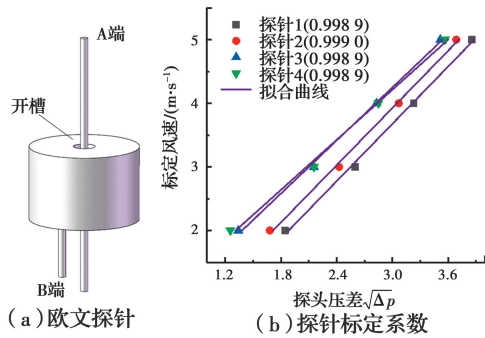


图 2 欧文探针

Fig. 2 Irwin sensors

1.3 加热装置

利用碳纤维电热板模拟不同地面温度,如图 3 所示。模拟前首先对碳纤维电热板进行温度标定,其中,温度在 0~60 °C 范围内可调,测温精度为 ± 1 °C,最大功率为 180 W/m²。

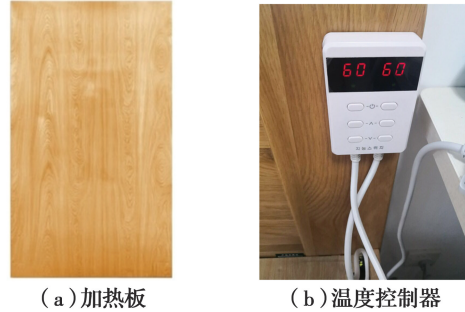


图 3 加热装置

Fig. 3 Heating device

1.4 污染物浓度测量装置

采用甲烷(CH₄)作为示踪气体,首先利用气体混合器控制甲烷和空气的混合比,待气体充分混合后在建筑群前端发射,利用低功率负压气泵对污染物气体进行采集,然后利用气相色谱分析其浓度。其中,体积混合比为 1:9,污染源放置于建筑物模型前方 1 m 位置,试验流程图如图 4 所示。

1.5 风洞实验相似条件

通过缩尺模型研究污染物扩散时,描述空气流动、传热和污染物扩散的物理参数包括雷诺数 Re 、罗斯贝数 Ro 、佩克莱数 Pe 、弗劳德数 Fr 和施密特数 Sc ,只有满足这 5 个无量纲参数,才能保证风洞试验模拟值与原型真实值严格相似。其中,当模拟区域长度小于 5 km 时,可忽略 Ro 数,模型和原型的流动都使用空气,可以忽略 Pe 数和 Sc 数,雷诺数作为主要相似数,其定义式为

$$Re = \frac{uL}{\mu} \quad (2)$$

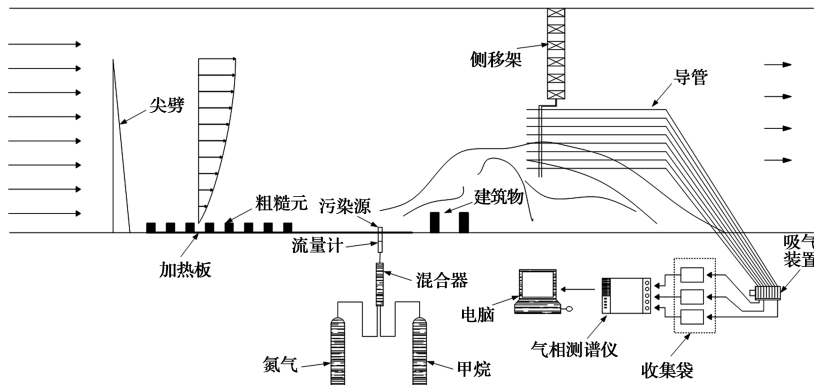


图 4 风洞污染物扩散试验流程图

Fig. 4 Flow chart of wind tunnel pollutant diffusion test

式中: Re 为雷诺数; u 为来流速度, m/s ; L 为目标建筑特征尺寸, m ; μ 为空气的黏性系数, $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时其值为 $1.789 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。使用 $1:100 \sim 1:1\ 000$ 的模型, 建筑物典型断面多为矩形, 本文 Re 约为 2×10^5 , 超过了临界雷诺数, 可近似认为流场不受雷诺数影响。

考虑地面热力效应对流场的影响, 采用理查逊数 Rb 代替密度弗劳德数 Fr , 其定义为

$$Rb = -\frac{gh_0}{u_0^2} \frac{\Delta T}{T_0 + 273} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; h_0 为模型高度, m ; ΔT 为实际温度与环境温度的差值, $^\circ\text{C}$; u_0 为高度 h_0 处的风速, m/s 。

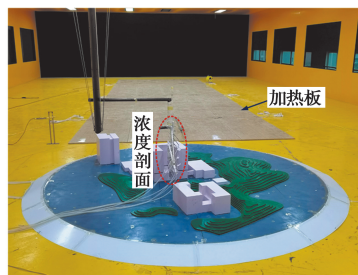
1.6 模型测点和试验工况

以长沙某在建传染病医院为研究对象, 考虑堵塞效应、壁面效应以及风洞转盘大小, 最终确定缩尺比为 $1:200$ 。西风作为主导风向, 综合考虑浓度场和风场的测量精度后, 采用 1.2 m/s 均匀风速作为入口来流, 利用 110 个欧文探针捕捉了人行高度 2 m 位置处平均风速, 并采用 Croba 风速仪对典型测点风廓线进行了详细监测, 监测点如图 5 所示。试验过程中, 风洞试验环境参数为: 温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 60% 、标准大气压, 通过改变碳纤维加热板的温度, 模拟了 $Rb=0.00$ 、 -0.10 、 -0.16 和 -0.23 共 4 种不同热力效应下的建筑群流场分布。同时, 对不同建筑朝向和不同植被覆盖下的流场和污染物浓度场进行了详细分析, 具体工况如表 1 所示。

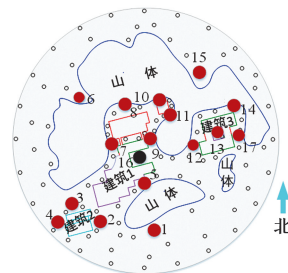
表 1 模拟工况汇总

Table 1 Summary of simulated test cases

影响因素	工况编号	工况描述	参考 Rb 数	建筑朝向/ $^\circ$
热力效应	1	1.2 m/s 平均风, 无植被	0.00	0
	2	1.2 m/s 平均风, 无植被	-0.10	0
	3	1.2 m/s 平均风, 无植被	-0.16	0
	4	1.2 m/s 平均风, 无植被	-0.23	0
建筑朝向	5	1.2 m/s 平均风, 无植被	0.00	0
	6	1.2 m/s 平均风, 无植被	0.00	45
	7	1.2 m/s 平均风, 无植被	0.00	90
	8	1.2 m/s 平均风, 无植被	0.00	135
植被	9	1.2 m/s 平均风, 大树	0.00	0
	10	1.2 m/s 平均风, 小树	0.00	0
	11	1.2 m/s 平均风, 无树	0.00	0



(a) 风洞模型图



(b) 监测点分布

图 5 风洞试验

Fig. 5 Summary of simulated test cases

2 热力效应下的医疗建筑群风环境分析

2.1 整体风场分布

研究显示^[21], 在对应某一风向下建筑物周围流场的无量纲是相对固定的, 定义风速比 MVR 为行人高度处风速与来流风速之比, 即

$$MVR = \frac{u_i}{u_0} \quad (4)$$

式中: u_i 为 i 号测点行人高度风速大小; u_0 为入口对应高度的参考风速。

通过试验得到主导风向下人行高度风速比分布, 如图 6 所示。由图 6 可知, 4 种热力条件下, 医院建筑物与山体之间的流场分布大致相同, 在 1 号建筑右侧形成了很明显的加速效应, 主要原因是建筑物与山体之间间距很小, 行成了“峡谷”效应, 对不同热力效应下风场最大值进行分析, 发现不同工况的加速效应有所不同, 4 种热力效应下风速的最大值分别是为 1.25、1.86、1.87 和 1.91。其中, 当 $Rb = -0.23$ 时, 加速效应最为明显, 说明热力效应在一定程度上影响了流场分布的最大值, 同时也说明在不稳定热力条件下近地面风速在局部位置出现了加速效应。

将人行高度风速汇总, 并进行两两对比, 如图 7 所示, 在主导风下, 风速比受到热力效应的影响主要

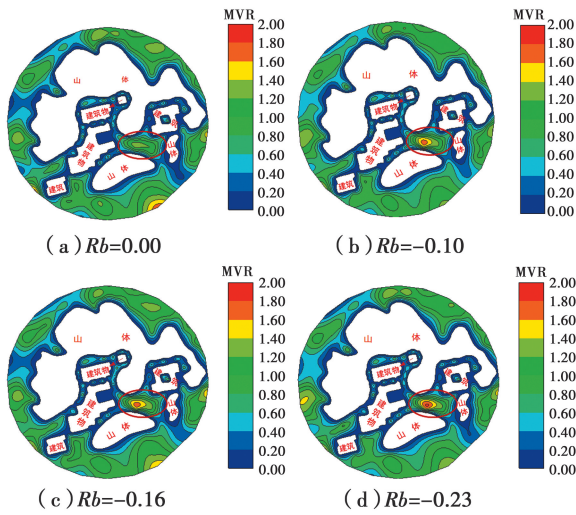


图 6 人行高度风速比分布图

Fig. 6 Wind field distribution of the pedestrian level

集中在 $0.6h_0$ (h_0 为建筑高度) 以下,对图 7 中 $0.6h_0$ 高度以下风速进行分析,发现风速均方根分别为 0.784、0.769 和 0.771;当高于 $0.6h_0$ 时,风速均方根分别为 0.481、0.453 和 0.468,说明当风速比大于 $0.6h_0$ 以后,热力效应对风场影响相对较小。

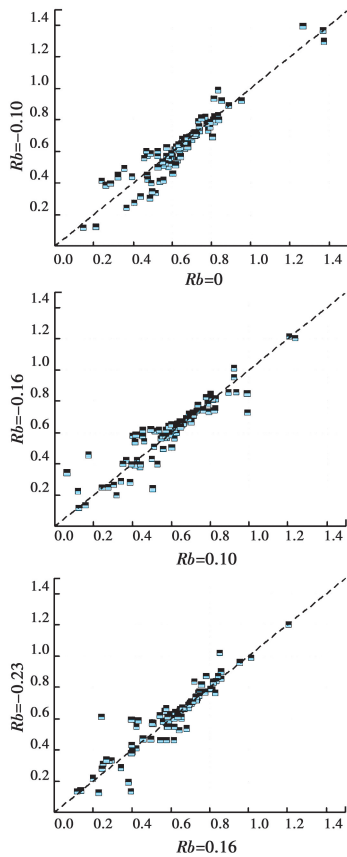


图 7 人行高度风速对比图

Fig. 7 Comparison of wind velocity of the pedestrian level

2.2 风速剖面分布

为揭示温度对建筑群风廓线的影响,沿高度方向对医院内部 16 号测点风剖面进行了详细分析,得到了该点顺风向风剖面无量纲风速分布,如图 8 所示。其中: $\bar{h}=h/h_0$, $\bar{h}=u/u_0$, $h_0=0.5\text{ m}$, u_0 为高度 h_0 处的风速。从图 8 中可知,高度在 0.5 以下,顺风向风速变化很小,相对入口来流风速整体偏低,平均值为 $0.2\bar{u}$,高度在 $[0.5, 0.8]$ 时,速度急剧增加,超过 0.8 之后,风速趋于稳定,与入口来流保持一致。总体来说, Rb 对顺风向风速的影响较小,主要原因是受到风洞试验条件的限制,模拟的 Rb 数范围为 $(-0.23, 0)$,大气不稳定程度相对较低,从而使得风速变化不明显。

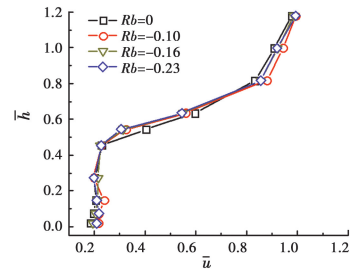


图 8 主导风向下 16 号测点顺风向风剖面

Fig. 8 Wind profiles of point 16 under prevailing wind direction

图 9 为 16 号测点剪切应力垂直分布图,从图中可以发现,在屋面高度位置剪切应力发生了突变,在 $Rb=0$ 时,剪切应力为负值。从中还可发现,高度在 $0.5\bar{h}$ 以下时,剪切应力变化很小;而高度在 $[0.5\bar{h}, 0.8\bar{h}]$ 时,剪切应力呈先减少后增加趋势;当高度超过 $0.8\bar{h}$ 后,剪切应力逐渐趋于稳定。

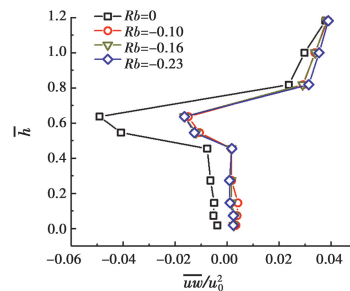


图 9 不同 Rb 数下测点剪切应力分布图

Fig. 9 Distribution of shear stress with different Rb numbers

3 热力效应下建筑群污染物浓度分析

以甲烷为示踪气体,在浓度检测前,先通过“针筒稀释法”配制出不同浓度的甲烷标气。利用气相

色谱仪测出甲烷标样的出峰时间和出峰面积,根据最小二乘法对甲烷浓度值与出峰面积进行标准曲线拟合,然后通过测点的出峰面积反算试验测点甲烷浓度值。

3.1 人行高度处甲烷浓度

试验过程中,对传染病医院内关键位置污染物浓度进行监测,通过分析发现,2、3、4号点靠近来流方向,风速未受到地表障碍物阻挡,浓度值相对较大,在同一 Rb 数下,建筑迎风面和背风面甲烷浓度值相差较大,主要原因是建筑背风面的涡流区污染物不易扩散^[22]。对2、3、4三点在不同 Rb 数下的浓度进行分析发现,甲烷浓度随着 Rb 数增大而增大,其增长值呈线性分布。图10(b)为7~11号测点的甲烷浓度值,测点7和测点9甲烷浓度值相对较小,主要原因是7和9号点处于廊道区域,风速出现了加速效应。相反的是,8、10和11号点在山体附近,通风不畅,污染物在这些地方出现了严重积聚现象。图10(c)为12、13和14号点的浓度分布,从中发现,该区域污染物浓度要显著大于2、3和4号测点,主要是这些测点受地表障碍物影响,风速相对较低,而13号测点甲烷浓度要低于12号和14号测点,原因在于13号点位于建筑通风廊道处,风场加速后有利于污染物扩散。对低风速不同热力条件下的风场进行分析发现,甲烷浓度值随着 Rb 数增大呈先增大后减小的趋势,主要原因是在低风速区域,污染物扩散受热效应影响占比较大,特别是当 $Rb = -0.16$ 时,污染物出现了积聚现象,相比于 $Rb = 0$,测点13甲烷浓度增加了一倍。总之,通过对建筑群人行高度污染物浓度场分析发现,污染物浓度的绝对值主要受风速影响,风速愈大其污染物浓度越低。在 $-0.23 < Rb < 0$ 范围内,试验显示风速较大时,随着地表温度的升高,污染物浓度依次递增。而风速较低时,污染物浓度受风速与温度的耦合影响,呈先增大后减小的趋势。通过分析建筑群内部污染物浓度发现,在热力条件下的浓度分布规律与常规的大气不稳定状态有所不同,说明建筑群复杂的地表形态改变了流场和温度场的近地面分布,其作用机理更为复杂。

3.2 甲烷浓度剖面分布

图10揭示了不同 Rb 数作用下污染物浓度的水平分布,图11对16号点的竖向污染物浓度进行了

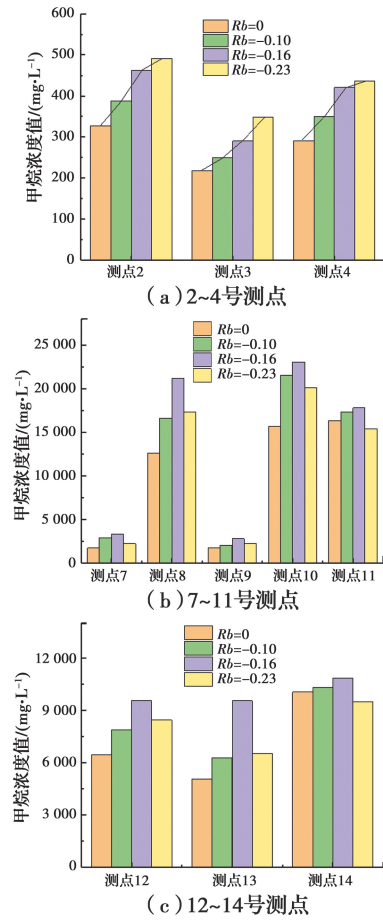


图10 不同 Rb 数下甲烷浓度值

Fig. 10 Values of methane concentration with different Rb numbers

分析,其中: $h_{ref} = h/h_0$, $C_{ref} = C/C_0$, h_0 为建筑物顶面高度, C_0 为建筑物顶面甲烷浓度。从图中可以发现,在同一 Rb 数下近地面位置甲烷浓度相对较高,且随着高度增加,浓度依次降低,当高度达到建筑高度后浓度接近于0,主要原因是建筑物上方的新鲜空气稀释了污染物浓度。对不同温度下的污染物浓度剖面进行分析发现,在 $[0.65h_{ref}, 1.2h_{ref}]$ 高度处,甲烷污染物浓度值随着 Rb 升高变化不明显,而当高度低于 $0.65h_{ref}$ 时,随着 Rb 增大,污染物浓度呈先增大后减小的趋势,其规律与图10(b)、(c)一致,当 $Rb = -0.16$ 时,污染物浓度达到最大值。同时,对不同高度位置不同热力条件下的污染物浓度进行分析,其结果如图12所示,从图中可以明显发现,在近地面低风速区域,污染物浓度在 $Rb = -0.16$ 时达到最大值。通过分析发现,随着 Rb 数的增加,污染物浓度并不是呈单调变化,主要原因是监测点位于建筑群内,地表风场紊乱,污染物浓度受地表风场与热力效应的耦合作用,常规的大气稳定理论在复杂建

建筑群近地表区域并不适用。

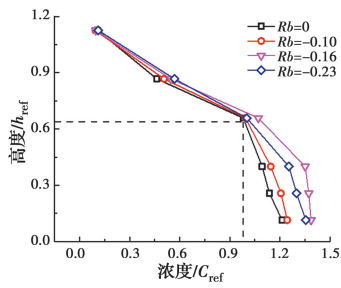


图 11 不同 Rb 数下建筑背风侧甲烷浓度

Fig. 11 Profiles of methane concentrations on the leeward side of the building with different Rb numbers

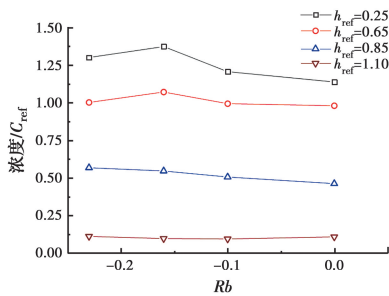


图 12 不同高度下的污染物浓度分布图

Fig. 12 Pollutant concentration distribution at different heights

4 医疗建筑群污染物控制措施分析

4.1 建筑布局对医院气悬污染物扩散影响

良好的建筑布局可有效调节城市住宅区的风环境^[23-24]。为分析不同建筑布局对污染物浓度的影响,研究过程中对建筑 3 进行了 0°、45°、90°和 135° 4 种不同朝向的分析,试验工况如图 13 所示。通过分析得到了不同工况下建筑 3 周边污染物的浓度分布,如图 14 所示。从图 13 中可以发现,在水平方向,14 号测点风速相对较小,污染物浓度绝对值最大,13 号和 14 号测点在方位角为 45°时,污染物浓度相对较低。图 15 显示了测点 17 沿垂直方向的污

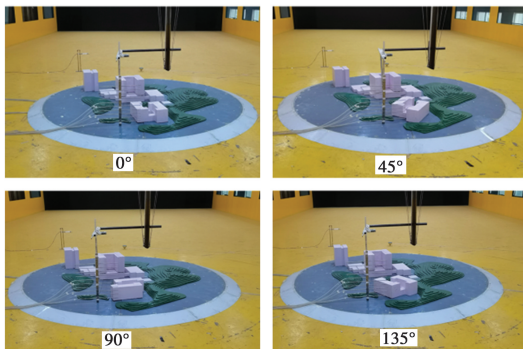


图 13 4 种不同建筑朝向工况

Fig. 13 Four cases with different building direction

染物浓度分布,从图中可以发现,随着高度的增大,污染物浓度依次减小,在 0°、90°和 135°工况下,甲烷变化趋势相同,而在 45°工况下,污染物浓度降低速度最快,其主要原因与建筑朝向有关,此时建筑朝向与主导风向一致,有利于污染物的扩散。对比图 14 和图 15 可以发现,建筑在 90°朝向时,最不利于污染物扩散,135°次之,45°则最有利于污染物扩散,建议在建筑规划时采用此种建筑布局。

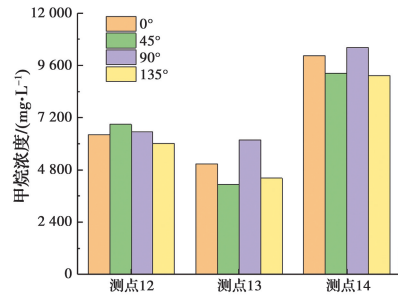


图 14 不同建筑朝向下行人高度甲烷浓度

Fig. 14 Methane concentration at pedestrian level under different building direction

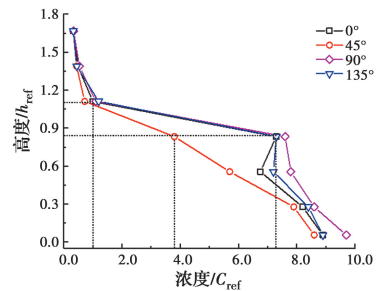


图 15 不同建筑朝向下行 17 号点甲烷浓度剖面

Fig. 15 Methane concentration profiles for point 17 under different building direction

4.2 植被对医院气悬污染物扩散的影响

为分析地表植被对污染物浓度的影响,在建筑布局为 0°时,获取了无植被、小树和大树 3 种工况下相关测点的污染物浓度。对矩形建筑而言,气流流至建筑时,会在建筑尾流区或建筑侧边形成回流区,如图 16 所示,污染物容易在回流区积聚^[25]。试验过程中,采用 2 cm×1 cm 和 4 cm×3 cm 两种植被尺寸对流场进行了分析,对应的实际高度分别为 4 m 和 8 m,植被与测点示意图如图 17 所示。从图 18 可以发现,3、4、10 号点分别位于建筑物回流区,通过分析污染物浓度发现,在添加植被后污染物浓度值均有一定程度的减小趋势,说明在建筑物回流区增设植被促进了污染物的扩散。测点 5 和测点 9 位于廊道处,位置相对狭窄,增设植被后发现污染物浓

度有增大趋势,其主要原因为植被降低了廊道通风率,致使测点风速减小,甲烷浓度升高。测点 13 位于建筑内部,植被对其影响相对较小。

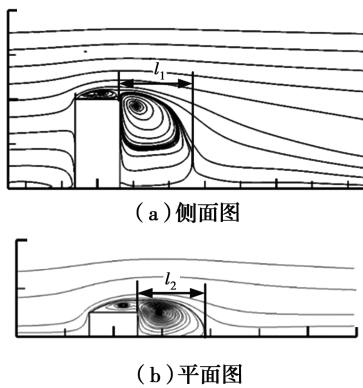


图 16 矩形建筑周围时均流线图

Fig. 16 Time-mean-flow diagram around rectangular building

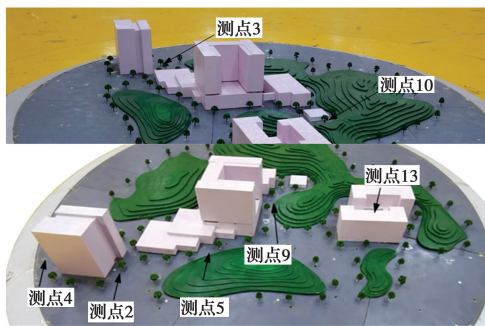


图 17 植被与测点布置图

Fig. 17 Layout diagram of the vegetations and monitoring points

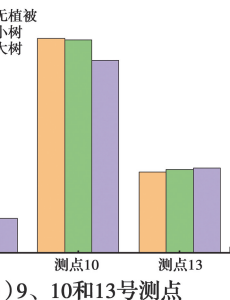
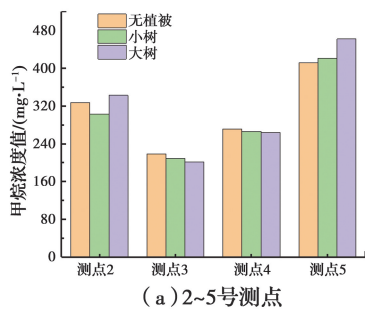


图 18 不同尺寸植被作用下甲烷浓度对比

Fig. 18 Comparison of methane concentration under different vegetation sizes

5 结论

以长沙市某传染病医院为研究对象,在考虑热力效应后对医院建筑群室外风环境和污染物扩散进行了风洞试验分析,获取了不同工况下医院风环境与污染物浓度分布的一般规律,同时探究了不同建筑布局和植被对医院污染物扩散的影响,得到了以下结论:

1)在 $-0.23 < Rb < 0$ 范围内,热力效应对医院内风廓线的顺风向分量和人行高度风场的整体影响较小,但在局部地区出现了一定的加速效应。

2)风洞试验显示,污染物浓度的绝对值取决于当地风速大小,在高风速时,污染物浓度与当地热力效应呈正比关系,而在低风速时,污染物浓度与当地热力效应呈先增长后下降关系,且在 $Rb = -0.16$ 时达到最大值。

3)对围合建筑而言,其内部风速相对较低,污染物浓度容易积聚,浓度在近地面位置达到最大值,且随着高度增长依次降低,热力效应对污染物浓度的影响主要集中在 0.6 建筑高度以下,当高度大于 1 倍建筑高度后,污染物浓度趋于 0。

4)改变建筑布局和添加植被是改善污染物浓度的有效办法,建筑规划时需考虑建筑形态与当地风速风向的耦合效应,当建筑朝向与主导风向一致时最利于污染物浓度的排放,植被增设 in 建筑回流区对气悬污染物扩散具有促进作用,增设 in 通风廊道则不利于污染物扩散。

利用风洞试验进行污染物扩散研究时,由于试验条件限制,很难获取较大跨度范围 Rb 数对浓度的影响,后续仍需用数值模拟对其进行机理分析。

参考文献:

[1] WANG H Q, HUANG C H, LIU D, et al. Fume transports in a high rise industrial welding hall with displacement ventilation system and individual ventilation units [J]. Building and Environment, 2012, 52: 119-128.

[2] 郭飞. 基于 WRF 的城市热岛效应高分辨率评估方法 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(1): 13-19.

GUO F. Assessment method of urban heat island high resolution based on WRF [J]. Journal of Civil,

- Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39 (1): 13-19. (in Chinese)
- [3] DWIVEDI A, KHIRE M V. Application of split-window algorithm to study Urban Heat Island effect in Mumbai through land surface temperature approach [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 41: 865-877.
- [4] HO C K. Modeling airborne pathogen transport and transmission risks of SARS-CoV-2 [J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 95: 297-319.
- [5] LI Z T, ZHANG H, WEN C Y, et al. The effects of lateral entrainment on pollutant dispersion inside a street canyon and the corresponding optimal urban design strategies [J]. Building and Environment, 2021, 195: 107740.
- [6] 黄远东, 王守生, 金鑫, 等. 城市街道峡谷内污染物扩散模拟中不同湍流模型比较研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, 23(2): 189-195.
HUANG Y D, WANG S S, JIN X, et al. A comparative study of various turbulence models for simulating pollutant dispersion within an urban street canyon [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(2): 189-195. (in Chinese)
- [7] 史瑞丰, 崔桂香, 王志石, 等. 城市小区空气流动与交通污染的大涡数值模拟[J]. 自然科学进展, 2009, 19 (2): 212-221.
SHI R F, CUI G X, WANG Z S, et al. Large eddy numerical simulation of urban residential area, air flow and traffic pollution [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(2): 212-221. (in Chinese)
- [8] FERNANDO H J S, ZAJIC D, DI SABATINO S, et al. Flow, turbulence, and pollutant dispersion in urban atmospheres [J]. Physics of Fluids, 2010, 22 (5): 051301.
- [9] 金玲, 赵立华, 孟庆林, 等. 广东地区农村住宅室内热环境优化研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37 (3): 116-126.
JIN L, ZHAO L H, MENG Q L, et al. Optimization analysis on indoor thermal environment of rural residential buildings in Guangdong Province [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(3): 116-126. (in Chinese)
- [10] LIU Y S, CUI G X, WANG Z S, et al. Large eddy simulation of wind field and pollutant dispersion in downtown Macao [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(17): 2849-2859.
- [11] NARDECCHIA F, GUGLIERMETTI F, BISEGNA F. How temperature affects the airflow around a single-block isolated building [J]. Energy and Buildings, 2016, 118: 142-151.
- [12] XIE X M, LIU C H, LEUNG D Y C, et al. Characteristics of air exchange in a street canyon with ground heating [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(33): 6396-6409.
- [13] 苗超, 苏亚欣. 工业厂房自然通风热环境的数值研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(Sup1): 54-57.
MIAO C, SU Y X. Numerical simulation of natural ventilation and thermal environment in industrial plant with heat source [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(Sup1): 54-57. (in Chinese)
- [14] 欧阳琰, 蒋维楣, 胡非, 等. 城市小区环境流场及污染物扩散的风洞实验研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 770-780.
OUYANG Y, JIANG W M, HU F, et al. Experimental study in wind tunnel in the field of air flows and pollutant dispersion in the urban sub-domain [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2003, 39(6): 770-780. (in Chinese)
- [15] HAJRA B, STATHOPOULOS T, BAHLOUL A. A wind tunnel study of the effects of adjacent buildings on near-field pollutant dispersion from rooftop emissions in an urban environment [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 119: 133-145.
- [16] HAJRA B, STATHOPOULOS T. A wind tunnel study of the effect of downstream buildings on near-field pollutant dispersion [J]. Building and Environment, 2012, 52: 19-31.
- [17] GOUSSEAU P, BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, et al. CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2): 428-438.
- [18] LIU X P, NIU J L, KWOK K C S, et al. Investigation of indoor air pollutant dispersion and cross-contamination around a typical high-rise residential building: Wind tunnel tests [J]. Building and Environment, 2010, 45(8): 1769-1778.

- [19] ZHANG Y, KWOK K C S, LIU X P, et al. Characteristics of air pollutant dispersion around a high-rise building [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 204: 280-288.
- [20] LIN C, OOKA R, KIKUMOTO H, et al. Wind tunnel experiment on high-buoyancy gas dispersion around isolated cubic building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 202: 104226.
- [21] 沈炼, 韩艳, 唐春朝, 等. 多因素作用下小区风环境风洞试验研究 [J]. *工程力学*, 2021, 38(5): 88-97.
SHEN L, HAN Y, TANG C C, et al. Study on wind tunnel test of wind environment under the influence of multiple factors [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(5): 88-97. (in Chinese)
- [22] 李海锋, 王博斌, 崔桂香, 等. 现代城区热环境与污染物扩散的大涡模拟研究 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45(10): 66-82.
LI H F, WANG B B, CUI G X, et al. Study on thermal environment and pollutant dispersion in real urban area by Large Eddy Simulation [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2015, 45(10): 66-82. (in Chinese)
- [23] KESHAVARZIAN E, JIN R Z, DONG K J, et al. Effect of building cross-section shape on air pollutant dispersion around buildings [J]. *Building and Environment*, 2021, 197: 107861.
- [24] MITTAL H, SHARMA A, GAIROLA A. Pedestrian level wind characteristics around tall buildings: Effect of building shape and wind direction [C]//9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Auckland, New Zealand, 2017.
- [25] LIU Z Q, LI W P, SHEN L, et al. Numerical study of stable stratification effects on the wind over simplified tall building models using large-eddy simulations [J]. *Building and Environment*, 2021, 193: 107625.

(编辑 胡玲)