

基于 CFD 的校区建筑群行人高度风环境分析与评价

傅 军¹, 赵牧野², 梁跃安¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学航空航天学院, 杭州 310027)

摘 要: 校园建筑群的规划需要考虑人的舒适度。以浙江理工大学下沙校区中心建筑群为考察对象, 对附近的行人高度风环境和空气污染物扩散情况进行了分析和评价。采用流体数值模拟技术 CFD 对各种影响因素进行了相应的计算, 最后给出了评价和优化建议。分析表明: 模拟情况与实地测量情况具有可比性; 目标区域风场将产生较大混乱气流; 不同的风速对于污染物的分布影响不大, 污染物倾向于在建筑物的迎风面高压区聚集。

关键词: 校区建筑群; 行人风高度; 风环境; CFD; 分析评价

中图分类号: TU224.3

文献标志码: A

0 引 言

对校区建筑群行人高度(距地面 0~5 m, 以 1.5 m 为主要参考)风环境进行评价具有重要意义^[1], 行人高度风环境主要研究方法有以下三种^[2-3]: 1) 实际测量与分析; 2) 风洞模拟实验; 3) 计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟。其中 CFD 具有成本低、周期短、参数变量易控制、模拟结果详尽等优势, 在建筑群行人高度风环境的模拟与定性评估方面广泛采用^[4]。对空气中污染物的扩散进行研究, 一般是基于多相流理论通过数值模拟来实现。数值模拟在大气污染物输送扩散的研究中有着广泛应用, 一般根据颗粒大小, 选用 Eulerian 模型或者 Mixture 模型进行多相流模拟^[5]。目前 CFD 的应用技术已较为成熟, 但其应用于校区建筑群行人高度风环境以及污染物扩散分析的报道尚不多见。

本研究浙江理工大学下沙校区中心建筑群(图书馆及周边建筑)为考察对象, 对行人高度风环境相关因素和空气污染物扩散情况进行了探究, 内容包

括: 行人高度风环境的数值模拟; 结合文献对行人高度风环境进行评估以及对空气中污染物扩散特性初步判别^[6-9]。

1 方案设计

1.1 模型建立

针对筛选得到的校区建筑设计图(图 1—图 3, 中心区域为图书馆、2 号教学楼、10 号教学楼, 之间区域为本次研究重点区域)建立校区几何模型。对部分建筑的几何外观进行了合理的取舍, 主要包括: 忽略图书馆入口处台阶的影响, 采用平均高度的大台阶进行近似; 忽略大楼顶部的部分细节和大楼东西两侧的附属结构; 教学楼和其他建筑物忽略了部分尺度小于 1 m 的结构和楼顶部的部分细节; 忽略部分教学楼连接过道的镂空结构等^[9]。

上述简化基于以下考虑: 目标风场为近地面(0~4 m), 大楼顶部细节对近地影响可以忽略; 部分过小的结构(小于 1 m)可能会导致网格量大量增加, 在增加精度有限的情况下大大增加了计算量。

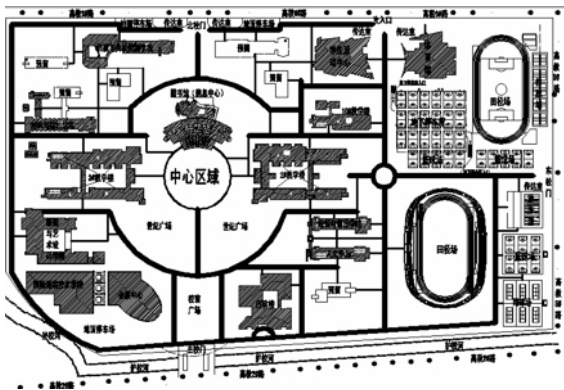


图1 浙江理工大学下沙校区建筑设计图(总图)

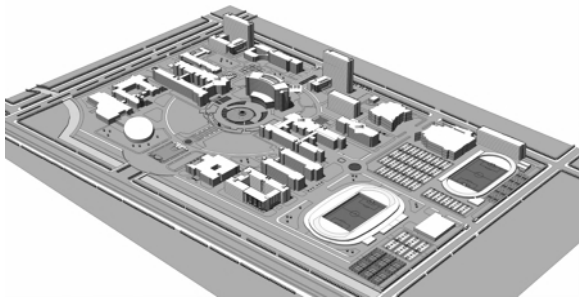


图2 浙江理工大学下沙校区总体效果图

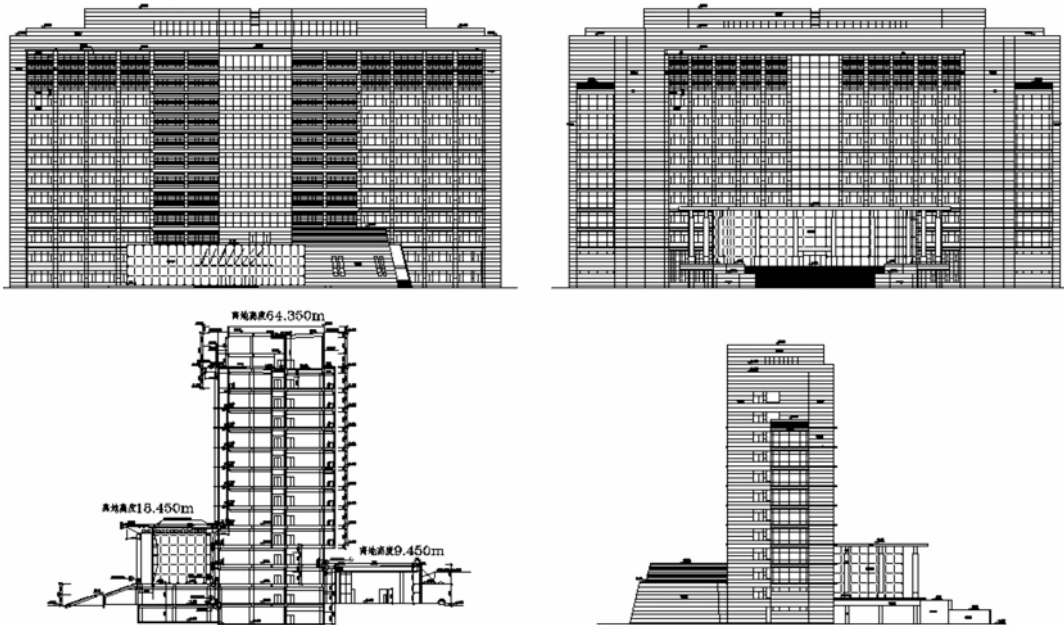


图3 浙江理工大学图书馆(剖面立面图)

1.2 数值模拟

对于大气边界层的处理,参考杭州气象局统计资料,选取若干个特定工况,进而简化为以特定工况作为边界和定解条件的数值计算问题。根据杭州市风力风向玫瑰图所得到的数据,春夏盛行东南风,秋冬盛行西北风,同时考虑到该校区并非正南北向建设,故采用风向为春夏南偏东 60°、秋冬北偏西 30°;参考蒲福风级定义,采用的风速工况为 4、6、8、10、12、14 m/s。根据行人高度和建筑群特点,垂直高度

观测点分别为 1、2.5、3.5 m 和 7 m;根据行人高度和污染物低空区域扩散特点,垂直高度观测点分别为 1、2.5、3.5 m 和 5 m。

1.2.1 网格划分

共划分了三种网格(表 1),以采用 119 万网格数的网格模型为主,其他网格作为辅助。计算域尺寸为东西向 1 000 m,为 x 轴,东为正;南北向 600 m,为 y 轴,北为正;垂直方向 500 m,上为正。网格划分采用 GAMBIT 软件进行。具体网格如图 4、图 5 所示。

表 1 网格模型参数

网格数	边界层设置	增长因子	密度函数设置	备注
119 万	不采用边界层	1.2	网格尺寸由近地面的 3 m 扩展到高空处的 50 m	主计算方案
218 万	不采用边界层	1.07	网格尺寸由近地面的 1.2 m 扩展到高空处的 50 m	次计算方案
520 万	边界层设置为建筑物表面和地面,共 4 层	1.2	网格尺寸由近地面的 2 m 扩展到高空处的 50 m	网格数急剧增大,试算方案

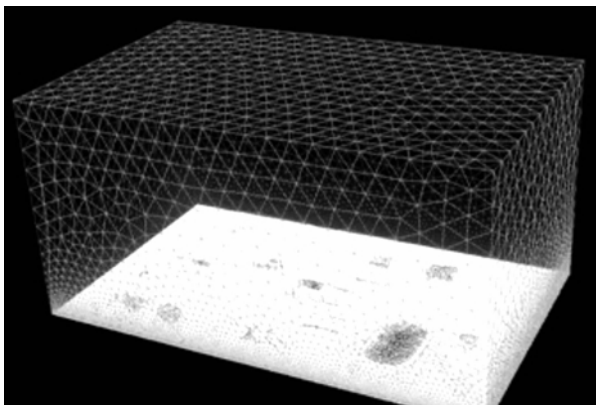


图 4 119 万网格数网格示意图

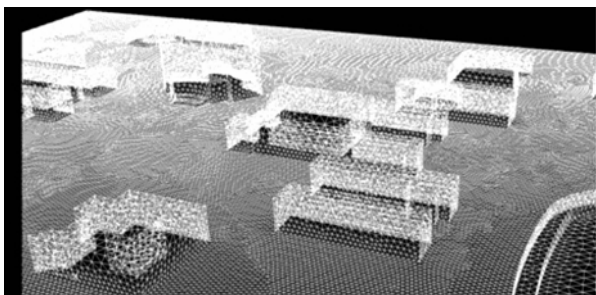


图 5 218 万网格数网格建筑物表面网格

1.2.2 入流边界条件

平坦区域的垂线流速分布一般通过幂次函数给出,垂直分布的湍流能量 $k(z)$ 可以通过风洞模拟或者对周边相应环境的观察得到,也可通过建筑与载荷中垂直剖面的湍流强度的经验公式。对于入流边界条件建议采用文献[10]所提出的方程组。其中通过假设一个对于高度恒定的剪切应力来定义空气边

界的 $U(z)$, $k(z)$ 和 $\epsilon(z)$ 在垂直方向上的分布:

$$\begin{cases} U(z) = \frac{U_{ABL}^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \\ k(z) = \frac{U_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \\ \epsilon(z) = \frac{U_{ABL}^{*3}}{\kappa(z+z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

其中, C_μ 是模型常数(取 0.09), κ 是卡门常数(取 0.3), U_{ABL}^* 是空气边界层的摩擦流动流速,采用下式计算:

$$U_{ABL}^* = \frac{\kappa U_h}{\ln((h+z_0)/z_0)} \quad (2)$$

其中, U_h 是参考高度 h 处的特征速度。

如果计算区域足够大,则顶部和侧面边界条件对于目标建筑物周边的计算结果并没有显著影响。在使用大计算区域的同时采用黏壁条件(法向速度分量及切向速度分量的法向梯度设置为 0)可以使计算更加稳定。

1.2.3 单相流数值计算参数

数值计算采用的 CFD 软件为 FLUENT6.2.3, 借助服务器进行并行计算。尝试多种算法组合后,综合考虑计算效率、计算精度,采取算法的具体设置如图 6 所示。

计算中采用基本方程与湍流方程联列求解。基本方程为基于压力的三维稳态隐式方程;湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型;采用 SIMPLEC 算法,其中湍流相关求解采用二阶迎风格式以保证较好的精度。

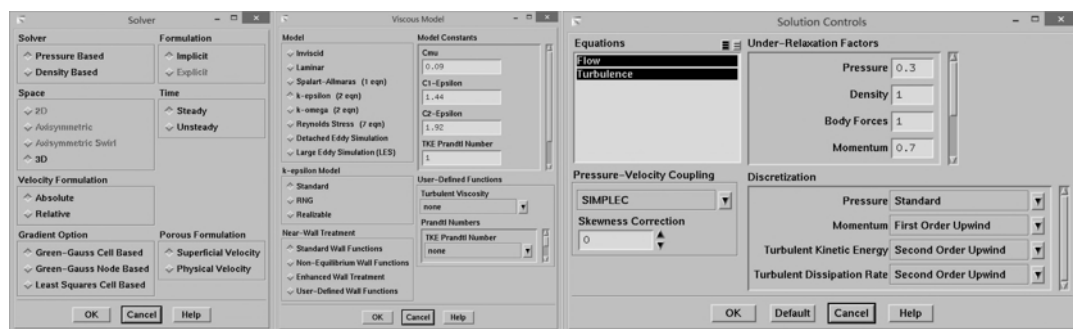


图 6 Solver 设置和湍流方程设置

其中春夏设置东南两侧及天空为入流边界,西北两侧为出口边界;秋冬设置西北两侧及天空为入流边界,东南侧为出口边界。为了将重力对计算的影响考虑在内,设置运行条件中 Z 向加速度为 -9.8 m/s^2 ,设置压力为一个标准大气压。为了保证计算结果的精确性,同时考虑到大网格对算法精度的影响,本研究中将目标数值的残差设定为 $1e-5$, epsilon 的残差为 $1e-4$ 。

1.2.4 多相流数值计算参数

与单向流计算相比,计算方程数将剧增,因此此处设定的残差为 0.001。计算中采用基本方程、多相流方程与湍流方程联列求解。基本方程为基于压力的三维非稳态隐式方程;湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型;采用多相流耦合的 SIMPLE 算法,其中湍流相关求解采用二阶迎风格式以保证较好的精度;多相流计算采用 Eulerian 模型。在对污染物扩散进行模拟的多相

流计算中,设定 phase-2 为次要相,即污染物 PM2.5,半径为 $2.5\ \mu\text{m}$,设置入流与出流边界中第二相的体积分数均为 $1\text{e-}5$,即表示大气中均匀富含该污染物。

2 计算结果

计算选用服务器列阵进行相关求解。对每个工况采用上述算法进行数值计算,达到相应残差要求后即视为已经收敛,后处理软件选用 TECPLOT。限于篇幅本文仅就“春夏季东南风 30° ,风速 $10\ \text{m/s}$, $z=1\ \text{m}$ 、 $5\ \text{m}$ 、 $7\ \text{m}$ ”的模拟情况做简要图示,详细计算模拟情况参见文献[11]。

2.1 春夏季东南风风环境模拟概况

以“东南风 30° ,风速 $10\ \text{m/s}$ ”为例, $z=1\ \text{m}$ 、 $7\ \text{m}$ 处风速相关结果见图 7—图 11。

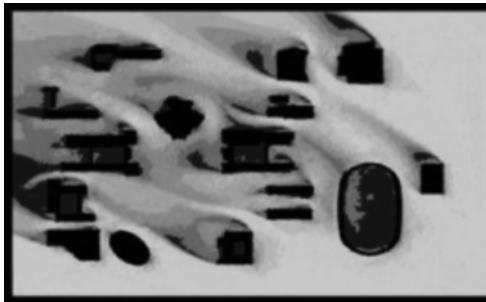


图 7 $z=1\ \text{m}$,整体速度云图

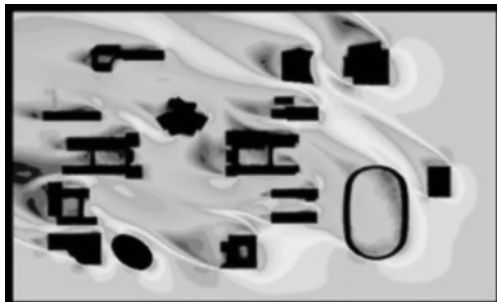


图 8 $z=7\ \text{m}$,整体速度云图



图 9 $y=80\ \text{m}$,目标区域速度云图

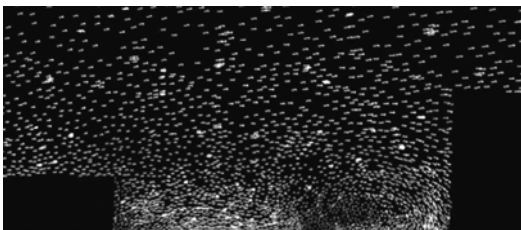


图 10 $y=80\ \text{m}$,目标区域速度矢量图

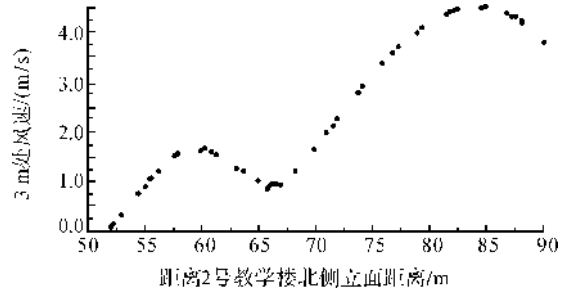


图 11 $x=118\ \text{m}$, $z=3\ \text{m}$,测量线速度剖面

2.2 春夏季东南风污染物模拟概况

以“东南风 30° ,风速 $10\ \text{m/s}$ ”为例, $z=1\ \text{m}$ 、 $5\ \text{m}$ 处污染物扩散相关结果见图 12—图 15。

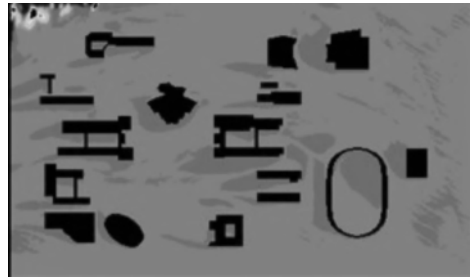


图 12 $z=1\ \text{m}$ 污染物体积分数云图



图 13 $z=1\ \text{m}$ 污染物速度云图

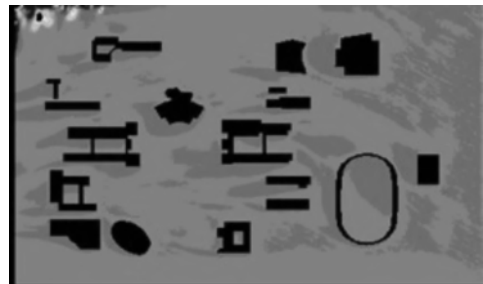


图 14 $z=5\ \text{m}$ 污染物体积分数云图



图 15 $z=5\ \text{m}$ 污染物速度云图

3 结果验证与分析

3.1 结果验证

采用数字式风速仪对目标区域的风速进行了实地测量:架着风速仪在某几个点上分别测量东西向和南北向的速度分量,测量过程中,由于难以实现速度剖面要求同时测量这一条件,同时考虑测量是为了定性分析速度变化趋势,以验证此处是否存在涡结构。故采用了一定的近似处理,即对于每一个测量点,分别对 x 和 y 方向测定3次,其中对于3次测量的方差大于1的数据组,再测量一组,以保证具有普遍性。最后速度值通过平方和开方得到。

就春夏两季的实地测量值与模拟值($x=118\text{ m}$, $z=3\text{ m}$, $50\text{ m}<y<90\text{ m}$)进行对比,如图16所示。图16可见,实地测量的速度剖面与数值模拟得到的速度剖面具有相似的趋势,数值模拟较好地模拟了实际的风环境。

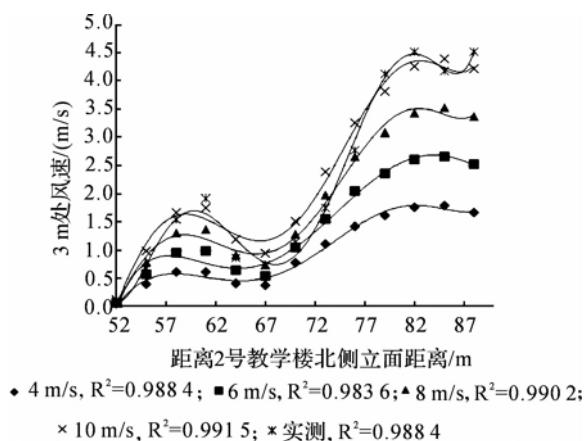


图16 测量线速度剖面及拟合

注:52 m处是全局坐标下的,即2号楼北侧立面,由于边界层效应,这里的风速可以认为是0。

3.2 结果分析

3.2.1 模拟风环境评价

数值模拟表明:在春夏季盛行东南风的情况下,目标区域(即图书馆、2号教学楼、10号教学楼之间的空间)会产生一个明显的涡流,同时2号教学楼北侧立面与10号教学楼南侧立面所形成的狭长风道,进一步加大了相关区域的风速。而在秋冬季盛行西北风时,由于东北角的8号教学楼的阻塞作用,通往目标区域的空气流速明显下降,使得目标区域并无明显的涡流,且速度梯度小、风速平稳,但由于图书馆与2号教学楼在来流方向上的投影有所重叠,使得2号教学楼北侧里面会产生局部高压,并产生一定的侧风。该目标区域将常年出现较大混乱气流。

这个现象与实际调查的结果基本一致。

根据速度云图发现,春夏季2号教学楼与10号教学楼之间形成的风道加速了目标区域的风速,而秋冬季图书馆背面的圆弧结构对来流具有一定的导流作用,加之图书馆与10号教学楼之间的风道也加速了目标区域的风速。建议改进方案:在两个风道的入口处设置景观墙、景观树木等方式来适当阻挡强风。

3.2.2 模拟风环境污染物流动评价

数值模拟表明:a)不同的风速对于污染物的分布影响不大;b)由于重力的影响,近地面的污染物浓度略高于高空污染物浓度;c)污染物倾向于在建筑物的迎风面高压区聚集。

污染物的流动情况与空气略微有区别,加之重力的影响,可能在校区少数区域出现污染物的聚集。通过对比污染物速度云图和污染物体积分云图可以看到:在污染物流动速度较低的区域往往拥有着相对较高的污染物浓度(体积分数)。建议改进方案:适当考虑增加目标区域的风速(引导部分风入流等)以提高污染物的清理能力,但是较高的风速又会导致行人高度风环境的恶化,因而需要在两者之间寻求一个平衡点。

4 结 语

通过对行人高度风环境的数值模拟,评估了相应的风环境,初步了解了空气中污染物在行人高度的扩散情况。分析表明:模拟情况与实地测量情况具有可比性;目标区域风场将产生较大混乱气流;不同的风速对于污染物的分布影响不大,污染物倾向于在建筑物的迎风面高压区聚集。

在上述工作的基础上以后可做进一步的改进:对网格进行进一步优化,同时部分考虑添加边界层,提高近地面湍流模拟的精度;以及进行区域内有源污染物扩散的稳态和非稳态分析。

参考文献:

- [1] 陈 飞. 建筑风环境:夏热冬冷气候区风环境研究与建筑节能设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:1-25.
- [2] 关吉平,任鹏杰,周 成,等. 高层建筑行人高度风环境风洞试验研究[J]. 山东建筑大学学报,2010(2):21-24.
- [3] 王勋年,李征初,张大康,等. 建筑物行人高度风环境风洞试验研究[J]. 流体力学实验与测量,1999,13(1):54-58.

- [4] 张爱社, 顾明, 张陵. 建筑群行人高度风环境的数值模拟[J]. 同济大学学报: 2007(8), 1030-1033.
- [5] 赵彬, 林波荣, 李先庭, 等. 建筑群风环境的数值模拟仿真优化设计[J]. 城市规划汇刊, 2002(2): 57-58, 61.
- [6] 李朝, 肖仪清, 滕军, 等. 基于超越阈值概率的行人风环境数值评估[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 15-21.
- [7] 汪新. 计算模拟建筑物对近源大气污染物扩散的影响[J]. 广东工业大学学报, 2007, 24(2): 51-55.
- [8] 孙源媛, 王泽. 城市街区内污染物扩散数值模拟研究综述[DB/OL]. [2012-04-04]. 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/htm>.
- [9] 唐毅, 孟庆林. 广州高层住宅小区风环境模拟分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2001, 33(4): 352-360.
- [10] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 1749-1761.
- [11] 赵牧野. 基于CFD的建筑群空气污染物扩散分析[D]. 杭州: 浙江大学航空航天学院, 2012.

Analysis and Evaluation Based on CFD of Wind Environment at Pedestrian Height of Campus Buildings

FU Jun¹, ZHAO Mu-ye², LIANG Yue-an¹

- (1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Planning of campus buildings shall take human comfort into consideration. With investigation objects of central buildings in Zhejiang Sci-Tech University Xiasha Campus, this paper analyzes and evaluates the wind environment and air pollutant diffusion at pedestrian height nearby, calculates various influencing factors by fluid numerical simulation technology CFD, and finally gives recommendations for evaluation and optimization. Analysis shows that: the simulated conditions are comparable to field measurement conditions; wind field of target regions will generate great chaotic airflow; different wind velocities have little influence on the distribution of pollutants, and pollutants tend to gather in high-pressure regions at the windward side of buildings.

Key words: campus buildings; pedestrian height; wind environment; CFD; analysis and evaluation

(责任编辑: 张祖尧)