文章编号:1674-2869(2024)06-0699-07

基于标准建筑群模型的行人高度风环境数值模拟研究

楚晨晖[1,2],孟 亮[1,2],朱瑶瑶[1,2]
1. 无锡环境科学与工程研究中心,江苏 无锡 214100;
2. 无锡城市职业技术学院建筑与环境工程学院,江苏 无锡 214100

摘 要:行人高度风环境是人居环境的重要考察指标。为研究建筑群的不同布局形式对行人高度(Z=1.5 m)风环境的影响,采用计算流体力学(CFD)技术对某标准建筑群模型进行了风环境数值模拟。首先,进行了网格无关性检验和模拟准确性检验,确定了可靠的网格方案和模拟条件。然后,通过数值模拟,得到并总结了标准建筑群模型的中心区域范围内的平均风速场、迹线场分布规律。接着改变建筑群模型的建筑密度、相对高度以及错落度等参数,研究不同条件因素对行人高度风环境的影响效应。研究结果表明:中心区域平均风速较来流风速有所增大,且存在若干旋涡区。在中心建筑前部、侧后方存在风速极值区域。中心区域平均风速对建筑密度的变化不敏感,但当建筑密度低于0.55时,风速快速衰减。周围建筑与中心建筑的高度比对中心区域平均风速影响显著,平均风速随高度比增加而降低,当高度比达0.5左右时,存在风速突降点。中心区域平均风速随错落度增加近似线性降低,不同错落形式的风环境差异明显。

关键词:行人高度风环境;标准建筑群模型;数值模拟;绿色建筑;计算流体力学
中图分类号:P425.6;TU984 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202303024

Numerical simulation of pedestrian-level wind environment based on standard urban building model

CHU Chenhui[1,2],*MENG Liang*[1,2],*ZHU Yaoyao*[1,2]
1. Wuxi Environmental Science & Engineering Research Center, Wuxi 214100, China;
2. School of Architecture and Environmental Engineering, Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi 214100, China

Abstract: Pedestrian-level wind environment is an important indicator of human settlements. To study the influence of different layouts of buildings on the wind environment at pedestrian height (Z = 1.5 m), computational fluid dynamics was used to simulate the wind environment of a standard urban building model. Firstly, the grid independence test and simulation accuracy test were carried out, and the reliable grid scheme and simulation conditions were determined. Then, through numerical simulation, the distribution law of average wind speed field and trace field in the central area of the standard urban building model was obtained and summarized. By changing the building density, relative height and degree of staggeredness of the building cluster model, the influences of different conditions on the wind environment were studied. The results show that the average wind speed in the central region is higher than that of the incoming flow, and there are several vortex regions. The extreme wind speed zone is directly in front of and behind the central building. The average wind speed in the central area is not sensitive to the change of building density, but when the building density is below 0.55, the wind speed rapidly decays. The height ratio of the surrounding

收稿日期:2023-03-16
基金项目:2021无锡城市职业技术学院“青蓝工程”项目(202138);2022无锡城市职业技术学院校级科研课题(WXCY-2022-KY-07)
作者简介:楚晨晖,硕士,讲师。Email:chuchenhui@163.com
引文格式:楚晨晖,孟亮,朱瑶瑶.基于标准建筑群模型的行人高度风环境数值模拟研究[J].武汉工程大学学报,2024,46(6):699-705.

buildings and the central building has a significant impact on the average wind speed in the central area. The average wind speed decreases with the increase of the height ratio. When the height ratio reaches around 0.5, there is a sudden drop in wind speed. The average wind speed in the central region decreases approximately linearly with the increase of the degree of staggeredness, and the wind environment of different staggered forms is significantly different.

Keywords: pedestrian-level wind environment; standard urban building model; numerical simulation; green building; computational fluid dynamics

随着城市发展和国民经济水平提高,人们的环保意识和健康舒适的居住理念不断提高,包括风环境在内的居住品质受到更多的关注。建筑群的布局形式会影响到建筑周围的风环境,尤其对行人高度范围内(1.5~1.8 m)的风环境影响最为显著。行人高度风环境的研究有助于改善市内空气质量、降低建筑能耗以及提升人居环境舒适度。因此,对行人高度范围内的风环境预测和优化,是建筑设计中必须考虑的重要因素。我国《绿色建筑评价标准》[1](GB/T 50378—2019)也给出了场地内风环境有利于室外行走、活动舒适和建筑的自然通风的具体评价标准。

随着计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)的不断发展和改进,以及计算机计算能力的不断提高,CFD方法被广泛应用于建筑规划设计在内的许多流体流动相关领域,为研究和解决工程问题带来了更加便捷可行的解决方案[2-3]。国内外诸多学者都采用CFD技术对建筑群人行高度风环境进行了研究。Blocken等[4]利用RNG k-ε湍流模型对埃因霍温理工大学的校园行人舒适风环境进行了分析,为城市行人风舒适性评估提出了大量建议。Zhang等[5]模拟了3种风向角下超高层建筑周围行人高度的平均风环境。发现建筑的外形、朝向、平面最大纵横比等参数对行人高度风环境影响显著,超高层建筑的存在使周围地区的最大风速增加了1.5~2.0倍。汪阔等[6]基于修正SST k-ω湍流模型对不同建筑密度、高度与错落度3种城市形态下的冠层风场进行了深入分析,获取了不同建筑形态下建筑物近地面平均风与湍动能的详细分布,将城市冠层风场随空间高度分为紊乱区、增长区和稳定区。杨易等[7]对日本建筑学会(Architectural Institute of Japan,AIJ)提出的标准建筑风环境模型,分别采用风洞试验、基于雷诺平均和大涡模拟的数值模拟方法,开展了考虑不同中央高层建筑高度和来流风向角对周围行人高度风环境影响的详细比较研究。研究发现:当风向角在0°~90°范围变化时,在高层建筑背风面和角区附近会产生行人高度风场加速的“文丘里效应”;其中当来流风向角为45°时,风加速情况最为显著,显示出斜风来流工况下会对高层建筑周边行人风环境带来最不利的影响。张爱社等[8]利用数值模拟研究了某建筑群周围风的绕流特性,发现在某些风向角下建筑之间会产生复杂的漩涡脱落现象,并使建筑拐角处的风速明显增大,恶化局部行人风环境。

目前,大部分学者都聚焦于某具体建筑布局的建筑群风环境,对工程实践虽然具有一定借鉴意义[9-12],但多限于特定形式的建筑群,而关于建筑群的布局形式对风环境的影响规律却挖掘不深。早在2008年,AIJ就提出了一种标准建筑群模型,该模型被广泛应用于建筑群风洞试验的精度校对以及理论研究中。同时该模型也被广东省《建筑风环境测试与评价标准》[13]用作CFD数值模拟的校准模型。前人对该建筑群模型进行了许多的研究工作,但关于建筑群的布局参数变化对风环境的影响方面的研究鲜有报道。模拟和观察标准建筑群风场环境,有助于更深刻地认识和了解行人高度风环境的风速场和旋涡分布规律。此外,研究各种建筑布局对行人高度风环境的影响,也可指导工程实践中的建筑布局设计。基于此,本文采用Fluent软件以标准建筑群模型的中心高层建筑周围风环境为考察对象,采用数值模拟方式,描述了中心建筑周围的风场特性,通过改变周围建筑群的平均高度、建筑密度以及错落度,研究不同建筑群布局对行人高度风环境的影响。研究结果可为工程实践和理论研究提供一定借鉴。

1 数值模拟有效性验证

1.1 基于AIJ标准建筑风环境模型建立

以AIJ提出的标准风环境验证模型为依据,对数值模拟有效性进行验证。其中中心建筑尺寸为25 m×25 m×100 m;外围建筑尺寸为40 m×40 m×10 m,为便于后续研究建筑错落度对风环境的影

响，还将外围建筑按交错位置分别定义为A、B两组建筑群，模型平面尺寸、测点布置以及建筑群编组等信息如图1所示。本文主要研究对象为中心区域内中心建筑周围的行人高度风环境。以中心建筑为参照，将中心区域分为8个分区，鉴于模型对称性，测点及观测区域仅在单侧布置。

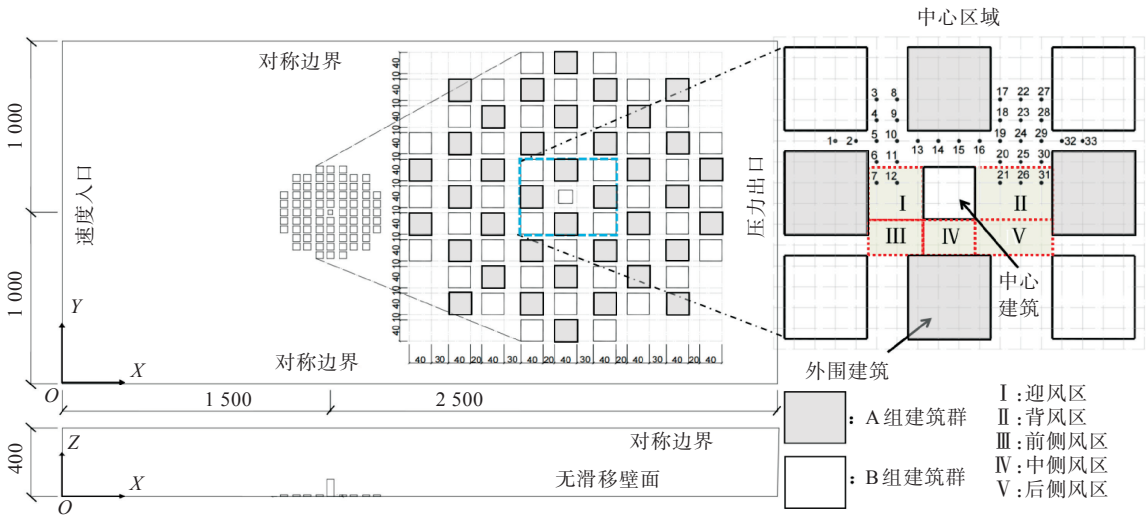

图1　AIJ标准建筑群风环境模型尺寸及测点布置（单位：m）

Fig. 1　Sizes of AIJ standard building complex model and measuring point layout

1.2　网格划分及计算参数

网格无关性检验是CFD数值模拟的必要工作。为保证模拟精度和合理降低网格数量，采用结构化网格对模型进行网格划分，同时为便于与缩尺风洞试验做比较，建立缩尺比为1∶300的缩尺有限元模型，如图2所示。通常以y^+表明网格第一层节点距壁面的无量纲距离，采用壁面函数模拟边界层流动时，y^+一般应控制在30~60[14]。调整地面近地面边界层第一层网格高度和流域内最小网格尺寸，通过试算，以满足壁面函数y^+要求。设计3组网格方案，网格信息如表1所示。计算域实际尺寸及边界条件如图1所示。

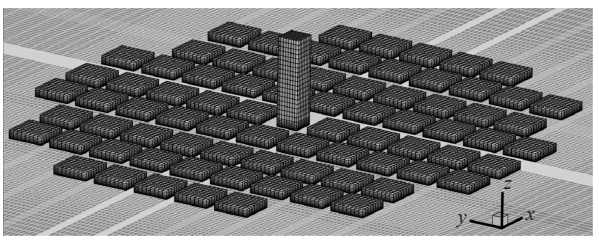

图2　AIJ标准建筑群风环境有限元模型

Fig. 2　Finite element model of wind environment of standard urban building model

数值模拟对计算资源需求较高，进行多工况风场模拟耗时较大。李琼等[15]建议在计算精度要求不高及计算时间有限的情况下，可采用标准k-ε湍流模型进行室外风环境数值模拟。由于本文是对不同布局的建筑群风场规律的定性分析，兼顾精度和效率，采用标准k-ε湍流模型进行定常分析。

表1　网格方案

Tab. 1　Grid scheme

网格方案	边界层第一层高度 / mm	网格单元总数 / 个
网格方案1	5.4	1 505 420
网格方案2	2.7	2 751 304
网格方案3	1.3	3 155 457

标准k-ε湍流模型是由Launder等[16]于1974年提出的。对于不可压缩流，其定常计算运输方程可表示为：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{x_j}\right]+S_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{x_j}\right]+S_\varepsilon \tag{2}$$

式(1)和式(2)中：ρ为流体密度(kg/m³)；u_i为流体速度(m/s)；x_i为流体坐标(m)；角标i为方向编号；μ为流体黏度(Pa·s)；μ_t为湍流黏性系数，$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$，$C_\mu$为经验常数，可取0.09；$\sigma_k$和$\sigma_\varepsilon$分别为$k$和$\varepsilon$的湍流Prandtl数，一般可取1.0和1.3；$S_k$和$S_\varepsilon$是自定义源项(m²/s³)；$k$为湍动能(m²/s²)，可由式(3)确定：

$$k=1.5\times[v(z)\cdot I(z)]^2 \tag{3}$$

式(3)中，$v(z)$和$I(z)$分别为z高度处平均风速(m/s)和湍流度，分别按式(4)和式(5)确定：

$$v(z)=v_{\mathrm{ref}}\left(\frac{z}{Z_{\mathrm{ref}}}\right)^{\alpha} \tag{4}$$

式(4)中：v_{ref}为参考高度处平均风速(m/s)，本文取11.3 m/s；z为测点高度(m)；Z_{ref}为参考高度(m)，取行人高度1.5 m；α为风场粗糙指数，B类地区可取1.4[17]。

$$I(z)=I_{10}\left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha} \tag{5}$$

式(5)中：I_{10}为10 m高处湍流度，此处B类地区可取1.5[17]。

ε为湍流耗散率(m/s²)，可按式(6)确定：

$$\varepsilon=C_{\mu}^{\frac{3}{4}}\cdot k^{\frac{3}{4}}/l \tag{6}$$

式(6)中：l为湍流积分尺度(m)，可按式(7)计算：

$$l=\begin{cases}100\cdot\left(\dfrac{z}{30}\right)^{0.5}, & 30<z<Z_G\\ 100, & z\leqslant 30\end{cases} \tag{7}$$

式(7)中：Z_{G}为积分界限高度(m)，可取计算域入口高度。

采用SIMPLEC格式求解离散方程，压力、动量项为二阶迎风格式，湍动能、湍流耗散率为一阶迎风格式。当速度、湍动能及湍流耗散率计算残差在10^{-4}数量级或风速曲线趋于稳定时，视为方程求解收敛。

1.3 数值有效性验证

图3给出了3组网格方案模拟的各测点平均风速比系数与文献[7]风洞试验所测数据结果对比。图3中，v_i为各测点计算平均风速，v_{r}为1.5 m行人高度来流参考风速，取11.3 m/s。由图3可以看出，整体上各网格方案模拟计算获得的风速系数与风洞试验结果趋势基本一致，尤其在1~26号测点吻合度较高，而27~33号测点各测点数据波动较大且与风洞试验数据离散程度较高。究其原因，数值计算模拟的是理想条件，而风洞试验本身也具有一定的物理条件影响和测量误差。此外，

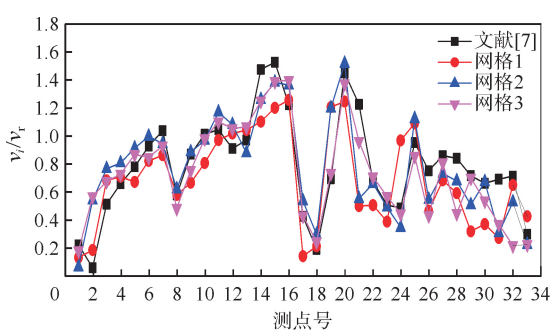

图3 数值模拟与风洞试验实测风速比对比

Fig. 3 Comparison of wind speed ratios measured by numerical simulation and wind tunnel test

可发现1~26号测点与高层模型距离相对较近，周围气流还未充分发展为涡流，因此模拟获得的数据较为稳定，而27号测点以后的区域远离高层模型，尾流已经得到一定发展和扩散，k-ε模型仅用时均方法难以精确描述涡流区的风速变化。但总体上，本文的数值模拟结果能够较客观地描述各测点的风速变化趋势，因此可以为后续的深入研究提供可靠数据支持。

2 标准建筑群人行高度风环境流场特性

图4给出了行人高度(Z=1.5 m)平面平均风速场示意图。由图4可知，中心区域平均风速略高于周围区域，即在中心建筑周围存在平均风速增益区，但均未超过规范限值2。紧贴建筑表面附近区域存在若干风速降低区域；周围一定范围内，随着测点远离中心建筑，风速逐渐回升，正前方和侧后方左右各有1处出现了明显的风速增加区域，且侧后方风速放大效应最为显著。在建筑布局设计中应充分考虑旋涡区位置，图5描述了中心区域范围内的平均风速迹线形态，可以看出，在中心建筑正后方出现2处明显的旋涡区，远离中心建筑的周围低矮建筑附近也存在若干旋涡区。根据《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)[1]相关规定，场地内行人活动区应远离旋涡区设置。

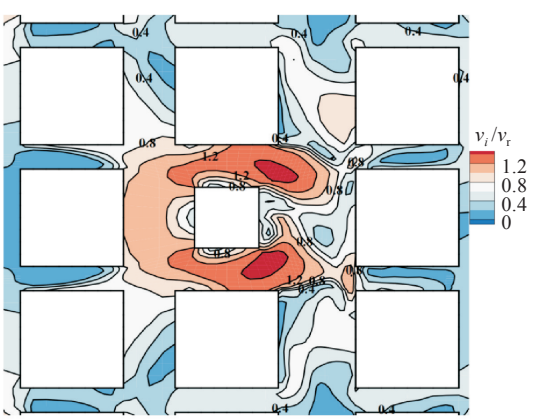

图4 Z=1.5 m高度平面平均风速场图

Fig. 4 Average wind speed field at 1.5 m height

3 不同布局下的建筑群风环境模拟

3.1 建筑密度对风环境影响

建筑密度是影响建筑群风环境的重要参数。选取5组不同建筑密度的建筑群模型进行风环境模拟，定义包括中心建筑在内的周围9幢建筑的建筑面积与总占地面积的比值为考察建筑密度变量：

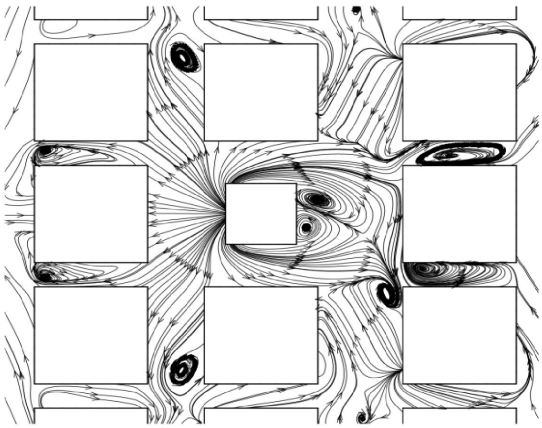

图5　Z=1.5 m高度平面平均风速迹线图

Fig. 5　Average wind trace field at height of 1.5 m

$$D=\frac{A_c+\sum A_a}{A} \tag{8}$$

式(8)中：D为中心区域建筑密度；A_c为中心建筑底层建筑面积，A_a为中心建筑外围建筑群底层建筑面积，A为中心区域占地面积，如图1所示。保持中心建筑底层建筑面积不变，通过改变外围建筑群底层建筑面积控制建筑密度参数。外围建筑边长由40 m过渡至20 m，增量5 m，由此带来建筑密度的变化，如图6所示。

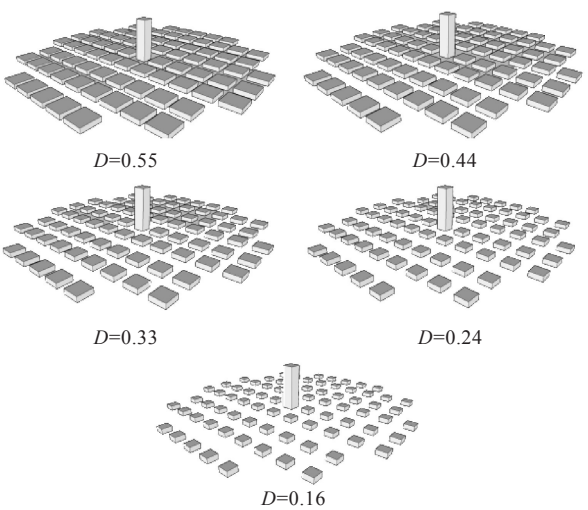

图6　不同建筑密度模型示意图

Fig. 6　Schematic diagrams of different building density models

通过模拟计算，得到中心建筑四周区域在不同建筑密度条件下的平均风速比变化曲线，如图7所示，图中v_{zoon}为测试区域内的平均风速(m/s)。观察图7可知，迎风区(Ⅰ区)平均风速比从1.0左右随着建筑密度先缓慢增加至1.3附近，而从D=0.44变化至0.55时，平均风速比急剧下降至1.0以下。背风区(Ⅱ区)平均风速比先增加，然后缓慢下降，最后急剧下降至0.7左右。前侧风区(Ⅲ区)平均风速比整体波动较小，同样在D=0.55时快速下降。中侧风区(Ⅳ区)平均风速比波动也相对较小，整体上处于1.3~1.4之间。由此可见，相较其他区域，中侧风区是明显的风速放大区域。建筑密度变化对后侧风区(Ⅴ区)的风速影响最显著，随着建筑密度的增加，该区平均风速比先略微增加，再迅速衰减。

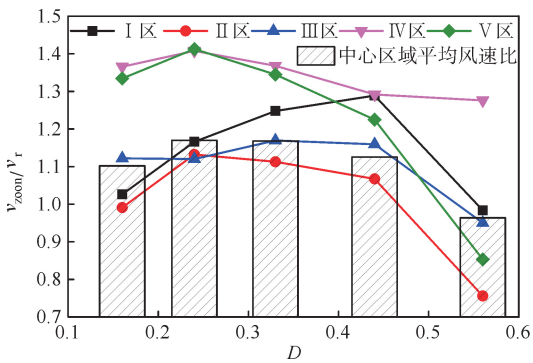

图7　平均风速比随建筑密度变化

Fig. 7　Variations of average wind speed ratios with building densities

整体上中心区域平均风速变化不显著(v_i/v_r=0.95~1.10)。随建筑密度增加，各区内风速相较来流风速均略有放大效应($v_i/v_r>1.0$)，当D增至0.55左右，除Ⅳ区具有明显风速放大效应外，其余各区风速衰减($v_i/v_r\leq1.0$)明显。

3.2　建筑群平均高度对风环境影响

保持中心建筑高度不变(H_c=100 m)，通过改变外围建筑高度(H_a=10~50 m，增量10 m)控制建筑群的相对高度比H_c/H_a，考察外围建筑高度对中心建筑的风环境影响。如图8所示。

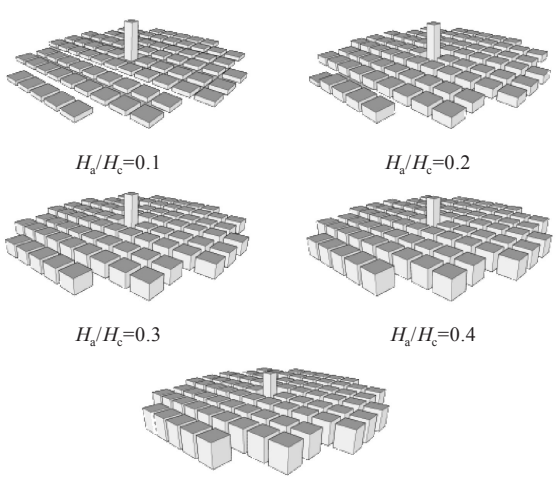

图8　不同高度比模型示意图

Fig. 8　Schematic diagrams of models with different height ratios

图9给出了建筑群高度比对中心建筑周围区域风速的影响，从图9中可以观察到，中心建筑周围区域的风速比变化趋势较为一致。除迎风区、侧风区风速局部增强外，各区域风速均随高度比增加而明显衰减。高度比在0.2~0.3范围内，区域风速存在突变点，风速下降最为显著。当高度比降至0.4、0.5左右，中侧风区会有局部的风速抬高，但整体风速处于较低水平，且各区域差异较小。由此可见，当外围建筑群高度达到中心建筑高度0.5左右时，中心建筑周围的行人高度风速较低且平稳。

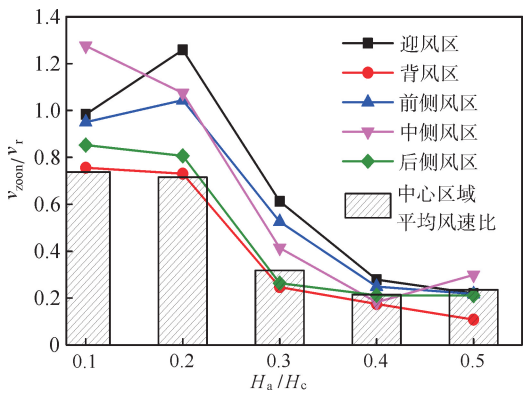

图9 风速比随建筑群平均高度变化

Fig. 9 Variations of wind speed ratios with average height of building groups

对比图7(v_{zoon}/v_r=0.95~1.10)，可发现建筑群平均高度对中心区域整体平均风速的影响更加显著(v_{zoon}/v_r=0.20~1.00)。

3.3 错落度对风环境影响

建筑群错落度也是考察风环境的重要因素。数值试验设计了2组不同错落形式的建筑群模型。将外围建筑按错落形式分为A组建筑群和B组建筑群，如图1所示。A组模型保持B组建筑群高度不变，通过改变A组建筑群高度调节建筑群错落度；同理，B组模型保持A组建筑群高度不变，改变B组建筑群高度调节建筑群错落度。定义错落度$S_{A(B)}$：

$$S_{A(B)}=\frac{H_{A(B)}}{H_c} \tag{9}$$

式(9)中：$S_{A(B)}$为A(B)组错落度，$H_{A(B)}$为A(B)组建筑群高度。A、B组错落度模型如图10和图11所示。

将2组曲线绘制于图12中。可以发现，2种错落类型建筑群的整体风速变化趋势较为相似，均随错落度增大而减小。进一步观察可知，A组模型各区域的离散程度较B组模型高，迎风区、前侧风区、中侧风区曲线较相似；背风区和后侧风区曲线高度相似，说明A组模型建筑正后方、侧后方的风速环境变化规律较为一致。B组模型中，当S_B达到0.3及以上时，各区域风速比变化趋势趋于一致，即当错落度较大时，B组模型各区域风环境差异度较小。采用等高建筑群模型时，区域风速比随建筑高度的变化存在突变点，而采用错落建筑群模型时，区域风速比随高度升高而均匀下降，不存在明显的风速突变点。

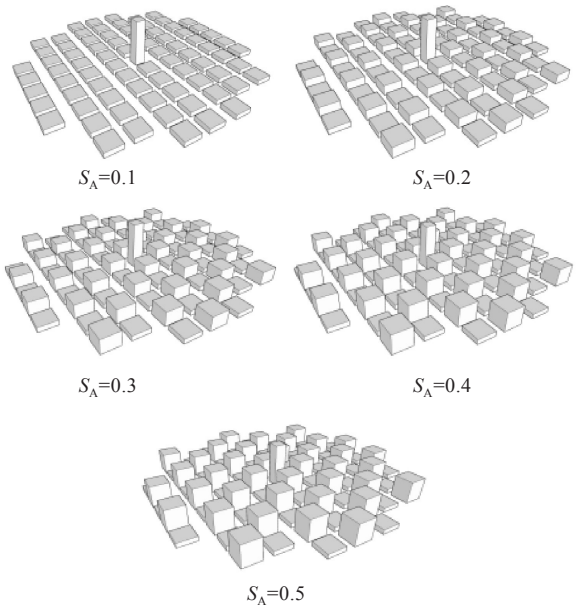

图10 不同错落度模型示意图(A组)

Fig. 10 Schematic diagrams of models with different staggered degrees(A)

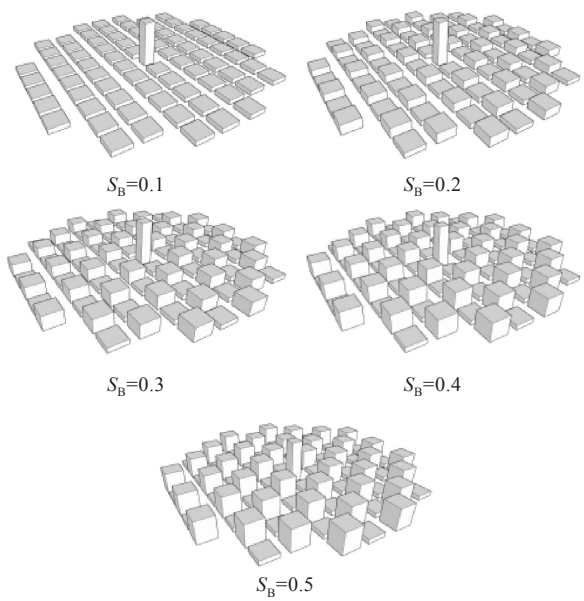

图11 不同错落度模型示意图(B组)

Fig. 11 Schematic diagrams of models with different staggered degrees(B)

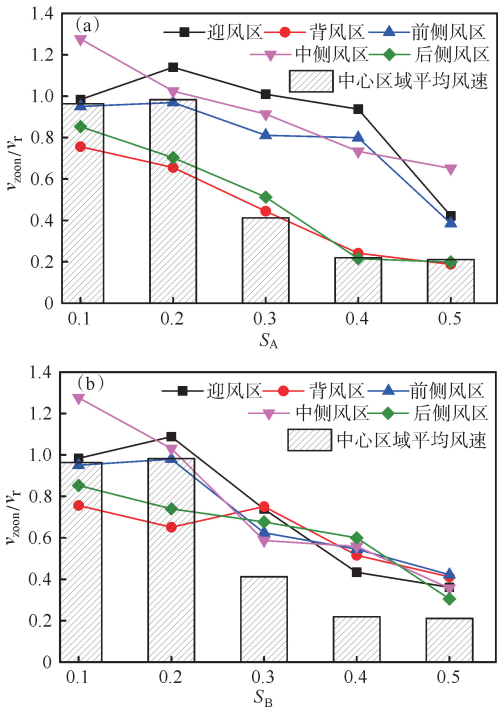

图12　风速比随建筑群错落度变化：(a)A组建筑群模型，(b)B组建筑群模型

Fig. 12　Variations of wind speed ratios with misalignment degrees of building group: (a) group A building complex, (b) group B building complex

4　结　论

为研究不同建筑布局对建筑群行人高度风环境的影响，基于CFD技术对AIJ标准建筑群风环境进行了数值模拟，通过分析得到以下结论：

(1)建筑群中心区域存在平均风速增益区，位于中心建筑正前方、侧后方，但风速比均未超过规范限值2。中心区域范围内存在若干旋涡区。

(2)建筑密度对行人高度风环境影响不显著。参考来流风速，当建筑密度小于0.55时，区域内整体平均风速有增益效应；大于0.55时具有衰减效应。

(3)周围建筑群高度对行人高度风速影响显著。中心区域风速随建筑高度升高而降低，当周围建筑高度达中心建筑0.5左右时，风速变化出现突变，急剧降低。

(4)错落度对行人高度风速影响显著，中心区域内平均风速随错落度升高而近似线性降低；不同错落形式对风速影响具有差异性。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色建筑评价标准：GB/T 50378—2019[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

[2] 朱鑫姝，殷勇，邓佩刚. 数据机房机架式服务器空气流动的数值模拟[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(6)：683-689.

[3] 闫渤文，魏民，鄢乔，等. 高层建筑形状及布局对城市街区行人风环境影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2021，48(11)：61-71.

[4] BLOCKEN B，JANSSEN W D，vna HOOFF T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas：general decision frame work and case study for the Eindhoven University campus [J]. Environmental Modelling & Software，2012，30：15-34.

[5] ZHANG X L，WEERASURIYA A U，LU B，et al. Pedestrian-level wind environment near a super-tall building with unconventional configurations in a regular urban area [J]. Building Simulation，2020，13(2)：439-459.

[6] 汪阔，沈炼，韩艳，等. 基于修正SST k-ω 湍流模型的建筑群风环境数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2021，53(3)：386-392.

[7] 杨易，张之远，余先锋. 基于一种标准城市建筑模型的行人高度风环境比较研究[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2022，50(6)：784-792.

[8] 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(自然科学版)，2007，35(8)：1030-1033.

[9] 徐晓达. 超高层建筑周边行人高度处平均风速分布特性及风环境评估[D]. 北京：北京交通大学，2019.

[10] 侯璐. 大连高校园区风环境模拟研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2017.

[11] 卢瑜. 超高层建筑底部区域的行人风环境研究[D]. 广州：华南理工大学，2021.

[12] 沈炼，邓万钞，唐春朝，等. 基于多尺度耦合的城市小区风环境大涡模拟研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版)，2019，32(3)：37-43.

[13] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑风环境测试与评价标准：DBJ/T 15-154—2019[S]. 北京：中国城市出版社，2019.

[14] 纪兵兵，陈金瓶. ANSYS ICEM CFD网格划分技术实例详解[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012：254-255.

[15] 李琼，持田灯，孟庆林，等. 建筑室外风环境数值模拟的湍流模型比较[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2011，39(4)：121-127.

[16] LAUNDER B E，SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering，1974，3(2)：269-289.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范：GB 50009—2012[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

本文编辑：苗　变