

基于 PHOENICS 软件的寒冷地区低碳建筑室外风环境模拟研究



乔军¹, 刘少亮^{2,*}, 郝翠彩², 张现¹, 张玉龙², 杨培元¹, 邢凯杰³

¹ 国网河北省电力有限公司建设公司雄安建设管理中心, 河北石家庄 050081

² 河北省建筑科学研究院有限公司智能与绿色建筑研究所, 河北石家庄 050227

³ 河北电力工程监理有限公司雄安建设管理中心, 河北石家庄 050081

摘要: 基于 PHOENICS 软件, 采用 κ - ϵ 的低速湍流数值模型, 定量分析在不同工况下低碳建筑人行高度处室外风环境的适宜性。通过寒冷地区石家庄典型年的气象参数, 确定了低碳建筑室外风环境 3 种模拟工况。结合数值模拟获得的全域流场信息, 确定了适宜的风环境参数。通过对各项风环境指标的分析发现: 所研究的低碳建筑全年风场流线较为明显, 无气流死区, 无明显漩涡区。不同工况下低碳建筑人行高度处的风速小于 5m/s (冬季、夏季和过渡季风速分别为 2.95m/s、2.54m/s、3.3m/s), 满足人体舒适度和标准规定要求。低碳建筑不同工况下 (冬季、夏季和过渡季) 的表面压力差不高于 5Pa, 满足该地区冬季防风要求, 同时有助于夏季通风符合舒适度要求。对低碳建筑风环境的研究能够有效地发现设计与实际使用过程的差距, 为实际工程建设提供有效的参考与指导。

关键词: 寒冷地区; 低碳建筑; PHOENICS; 风环境; κ - ϵ 模型

DOI: 10.57237/j.se.2023.01.001

A Simulation Study of the Outdoor Wind Environment of Low Carbon Buildings in Cold Regions Based on PHOENICS Software

Jun Qiao¹, Shaoliang Liu^{2,*}, Cuicai Hao², Xian Zhang¹, Yulong Zhang², Peiyuan Yang¹, Kaijie Xing³

¹Xiongan Construction Management Center, State Grid Hebei Construction Company, Shijiazhuang 050081, China

²Institute of Intelligent and Green Building, Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China

³Xiongan Construction Management Center, Hebei Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd., Shijiazhuang 050081, China

Abstract: Based on PHOENICS software, the suitability of the outdoor wind environment at pedestrian heights of a low-carbon building under different operating conditions was quantitatively analysed using a κ - ϵ numerical model of low-speed turbulence. Three simulated conditions for the outdoor wind environment of low carbon buildings were determined by typical annual meteorological parameters for Shijiazhuang in cold regions. Combining the information on the full domain flow field obtained from the numerical simulations, the appropriate wind environment parameters were

基金项目: 河北省电力工程监理有限公司科技项目 (SGHEJL00LJJS2200014); 河北省重点研发计划项目 (21374501D).

*通信作者: 刘少亮, tdfzx2022@163.com

收稿日期: 2022-12-03; 接受日期: 2023-01-06; 在线出版日期: 2023-01-12

<http://www.sciandeng.com>

determined. The analysis of the wind environment indicators revealed that the low carbon buildings studied had clear year-round wind flow lines, with no dead zones and no obvious vortex areas. The wind speed at the pedestrian height of the low carbon building under different working conditions was less than 5 m/s (Wind speed in winter, summer and transitional season were 2.95 m/s, 2.54 m/s, and 3.3 m/s respectively), which meets the requirements of human comfort and standard regulations. The surface pressure difference between the different operating conditions (winter, summer and transitional seasons) of the low carbon building is not higher than 5 Pa, which meets the requirements for wind protection in winter in the area and contributes to the comfort level required for ventilation in summer. The study of the building wind environment can effectively identify the gap between the design and the actual use process, providing effective reference and guidance for the actual construction.

Keywords: Cold Regions; Low Carbon Buildings; PHOENICS; Wind Environment; κ - ϵ Model

1 引言

随着我国城镇化水平的不断提高以及“双碳”目标的提出,建筑节能和建筑环境舒适度也再一次得到人们的关注。人们对于建筑环境舒适度的关注不仅仅局限于建筑室内环境质量和舒适度,而且对室外建筑周边活动区域的环境尤为关注,尤其是建筑室外风环境。

建筑室外风环境的研究最早开始于 1963 年, Baines 等基于风洞试验和现场调研考察,研究了建筑的室外风环境影响特征。贾彬等人[1]首先对风洞试验在我国建筑工程中的应用进行了大量的回顾分析,认为风洞试验对于研究高层建筑、大跨空间结构、高耸塔桅结构等建筑物的风环境有着重要作用。建筑室外风环境受到多方面因素影响,如建筑高度、形状、层数、排布方式和建筑架空形式等。基于风洞试验,结合计算流体动力学方法,闫渤文等人[2]研究了高层建筑形状及布局对城市街区行人风环境的影响。合理的高宽比和建筑板式排布方式可以促进自然通风、局部减弱来流风速[3, 4]。水滔滔等人[5]则是通过分析建筑底部架空对于住区人行高度风环境以及建筑表面风压的影响,发现在夏季主导风向向下无架空情况更有利于形成良好的室内通风。Ying et al. [6]发现建筑层数越多、建筑高度越高,行人高度的室外舒适风区面积越大。

胡一东等人[7]研究发现目前室外风环境仿真模拟存在诸多问题(模型边界条件设定不明确、研究的关键技术要点表述不规范、处理方法缺乏科学性等问题)。因此,从模型的计算区域、离散求解方程、网格划分等因素进行逐一分析,采用单因素和多因素相结合的分析方式,提高风环境模拟规范化水平[7]。谭献良等人[8]基于规范化的理论,结合 BIM 技术,采用小参数方法建立随机有限元模型,建立建筑风环境 BIM 模拟

与可靠性评价方法,使得仿真模拟更加符合工程实际。Zhu et al. [9]通过理论分析和数理耦合的方法,构建风适宜度模型。基于优化模型龚晨等人[10]发现离地 1.5 m 处风速主要发生区域为小区过道入口,建筑物长度对小区风环境的影响较为显著。

此外,众多学者通过对建筑室外风环境的研究,提出了一些利用建筑自身特点实现优化风环境的措施。石峰等人[11]定量地分析了建筑天井几何形态特征与建筑风环境之间的关系。郭昊翔等人[12]结合实际工程,通过合理利用公共建筑的竖井空间方位和相对位置改善了建筑通风的舒适性和均匀性,从而使通风环境达到人体舒适范围。

回顾之前的文献,发现之前的学者们在研究过程中,很多研究都未涉及到寒冷气候条件下不同季节的风环境研究。另外,对于低碳建筑的风环境研究还较少。因此,本文针对寒冷地区低碳建筑,利用 PHOENICS 软件对其风环境进行数值模拟,以便得出低碳建筑室外风环境舒适性的影响。

2 低碳建筑模型建立与参数选取

2.1 几何模型

在建筑室外环境的研究过程中,PHOENICS 软件得到了广大研究人员的认可[13]。PHOENICS 软件经过长期的发展已经包含多种模型,常见的模型主要有雷诺应力模型、通量模型、多流体湍流模型和 κ - ϵ 模型[14]。在建筑风环境的研究过程中, κ - ϵ 模型被广泛应用。究其原因是因为建筑室外风流体符合 Boussinesq 假设[15]。它是一种不可压缩、低速湍流流体。因此本文选

用 κ - ε 模型对建筑附近风场进行模拟。

所研究的低碳建筑处于寒冷地区的石家庄, 石家庄气候属于暖温带大陆性季风气候, 春夏秋冬四季分明。基于石家庄夏季、冬季和过渡季的风向变化特点, 结合《中国建筑热环境分析专用气象数据集》相关规定, 最终确定石家庄夏季、冬季和过渡季风向及风速特征如表 1 所示。

表 1 石家庄不同季节风特征

	夏季	冬季	过渡季
盛行风平均风速	1.7 m/s	1.8 m/s	2.0 m/s
盛行风向	SSE	NNE	N

由于所研究的目标建筑处于园区多个建筑围绕下, 故而将周边建筑纳入模型生成范围。此外, 不考虑建筑内部结构和布局, 对低碳建筑进行简化, 简化模型如图 1 所示。

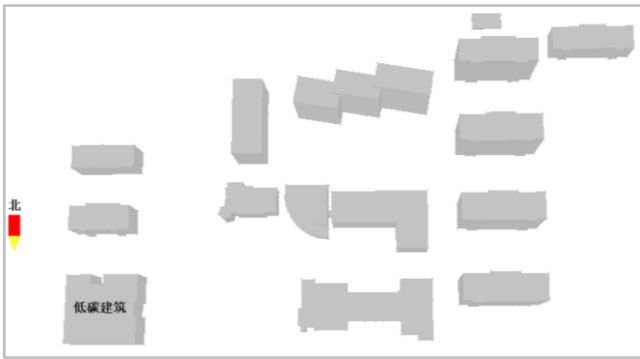


图 1 低碳建筑简化模型

2.2 数学模型

在数值模拟计算中, ε 方程被广泛应用于靠近壁面的流体中。在紊流的工程计算中, 由于 κ - ε 模型的低成本、小波动、高精度等优势被广泛应用, 通过以下控制方程可以求得。

$$\begin{cases} \frac{\partial U_j}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial U_j}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \frac{\partial U_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) \\ \frac{\partial k}{\partial x_j} = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \frac{v_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + v_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \\ U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + R \end{cases}$$

其中, U 为平均速度, m/s; U_i 为平均速度在 x 轴的分量 m/s; P 为平均压力, Pa; k 为湍动能, J; ε 为

湍能耗散率; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; ν 为气流运动粘度, m^2/s ; ν_t 为湍流团运动粘度, m^2/s 。

为了避免出现不合理的压力和速度, 采用有限容积法进行方程离散。同时采用一阶差分格式, 采用 SIMPLEST 算法进行压力与速度的解耦。为了避免计算区域不满足风场作用范围, 选取较大的计算区域。本次模拟计算选取的计算区域高度为建筑高度的 4 倍, 来流方向为建筑宽度的 3 倍, 出流方向为建筑宽度的 5 倍, 计算区域宽度为建筑宽度的 4 倍。

2.3 边界条件

(1) 入口边界条件

由于建筑 1.5 米处的空气近似属于不可压缩流体, 同时考虑到地表摩擦作用会形成梯度风[16]。因此, 入口边界的风按照梯度风处理。采用指数关系分析及修正梯度风, 其控制方程为:

$$V_h = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n$$

其中, V_h 为高度为 h 处的风速, m/s; V_0 为基准高度 h_0 的风速, m/s; n 为幂指数, 根据所研究区域地形粗糙度确定, 取 0.22。

(2) 出口边界条件

假定出流面的流动已经充分发展, 由于模拟区域小于数值模型的计算区域, 这时出流面的流动情况限制极小, 流动已恢复正常流动, 此时的正常流动可以理解为无建筑物阻碍。因此, 出口压力设为大气压。

(3) 上空面及两侧面的边界条件

上空面及两侧面的边界条件设为自由滑移表面。由于本次模拟所选的计算区域较大, 可看作沿切线方向的速度梯度为 0。建筑物的影响不会涉及到上空和两侧的空气流动。因此, 可设为自由滑移表面。

(4) 建筑壁面及下垫面的边界条件

由于标准 κ - ε 模型只适用于完全湍流区域。在固体壁面附近, 完全湍流区域出现在离开壁面一定距离的地方。因此须对标准 κ - ε 模型加以修正。结合实际, 本次模拟采用壁面函数法加以修正建筑物边界区[17]。

3 模拟结果分析

针对夏季、冬季和过渡季三个季节的特点, 分别模拟如表 2 所示的 3 种工况下的风环境特征。

表 2 低碳建筑不同工况下的风环境特征

分类	季节	风向	风速 (m/s)
工况 1	夏季	风向 S	1.7
工况 2	冬季	风向 NNE	1.8
工况 3	过渡季	风向 N	2.0

3.1 工况 1

基于建立的模型，结合工况 1 的参数条件（夏季风向为 S、风速为 1.7 m/s），模拟得出了低碳建筑在人行高度处（距离地面 1.5 m 处）风速、风压以及放大系数，如图 2 所示。

图 2（a）（b）分别表示了工况 1 条件下的人行高度处（距离地面 1.5 m 高度处）风速矢量及风速分布云图。可以看出，在夏季工况下，低碳建筑周围的风场流线较

为明显，不存在气流死区和明显漩涡区影响建筑周围区域的空气质量。低碳建筑在人行高度处风速基本在 2.54 m/s 之内，最高风速出现在建筑转角处，南北走向的主要人行通道处风速在 1.57~2.35 m/s 之间。因此，可以认为该建筑周围人行高度处风速符合舒适性要求和 GB/T 50378-2014 标准要求。图 2（c）~（e）分别表示了工况 1 条件下 1.5m 高度风压分布云图、建筑物迎风面风压云图和建筑物背风面风压云图。分析图 2（c）~（e）可以发现夏季工况下，1.5 m 高度处建筑迎风面风压在 0.09~1.62 Pa 之间，建筑背风面风压小于-0.66 Pa，前后压差有利于夏季自然通风。此外，根据图 2 数据显示，建筑周边风速都小于 2.15m/s，与来流方向开阔地表风速相比，人行高度区域内风速放大系数（图 2（f））均小于 2，符合室外出行舒适度要求，满足 GB/T 50378-2014 的要求。

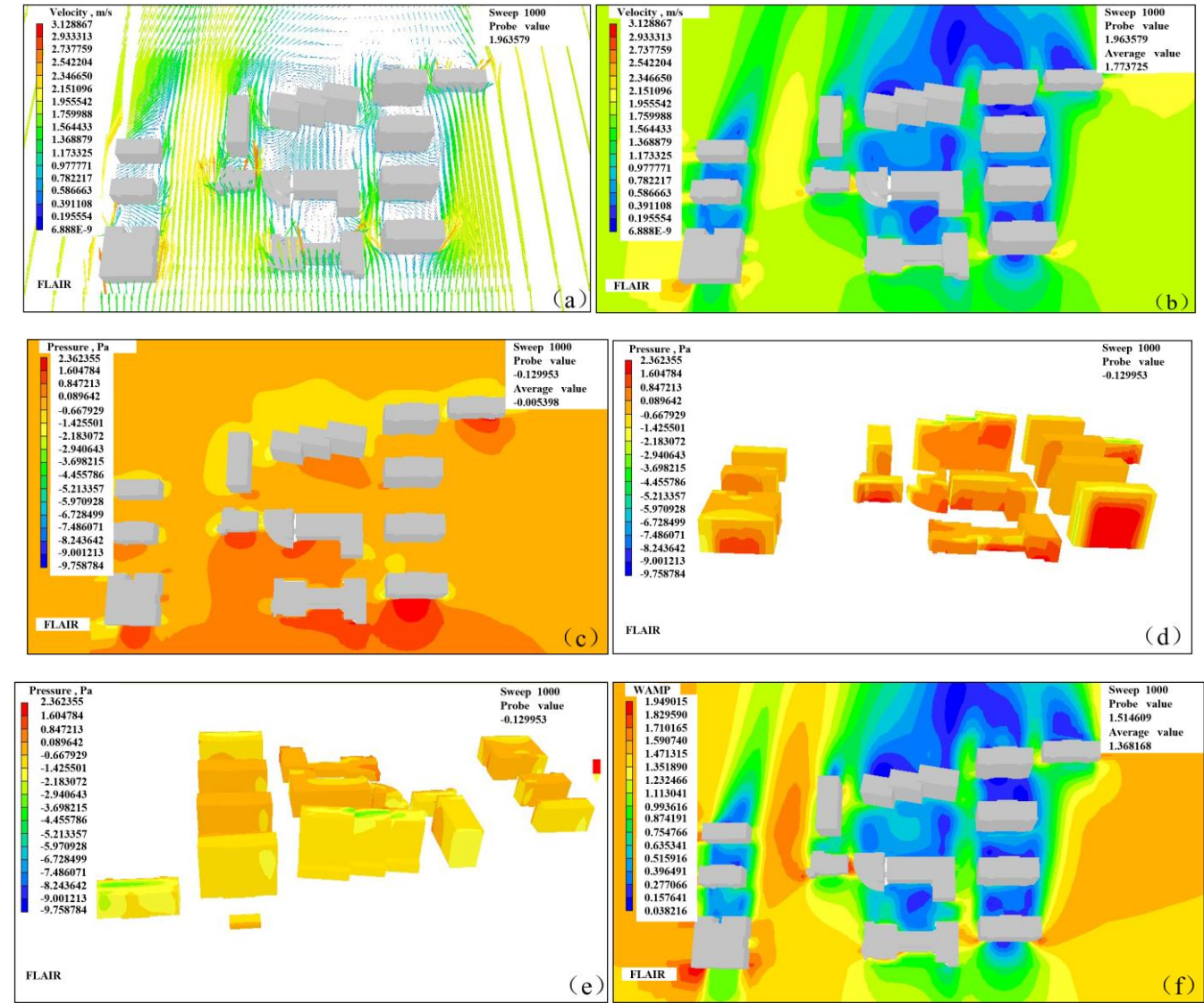


图 2 工况 1 风环境模拟结果图

3.2 工况 2

基于工况 2 的参数条件（冬季风向为 NNE、风速为 1.8 m/s），模拟得出了低碳建筑在 1.5 m 处风速、风压以及放大系数，如图 3 所示。

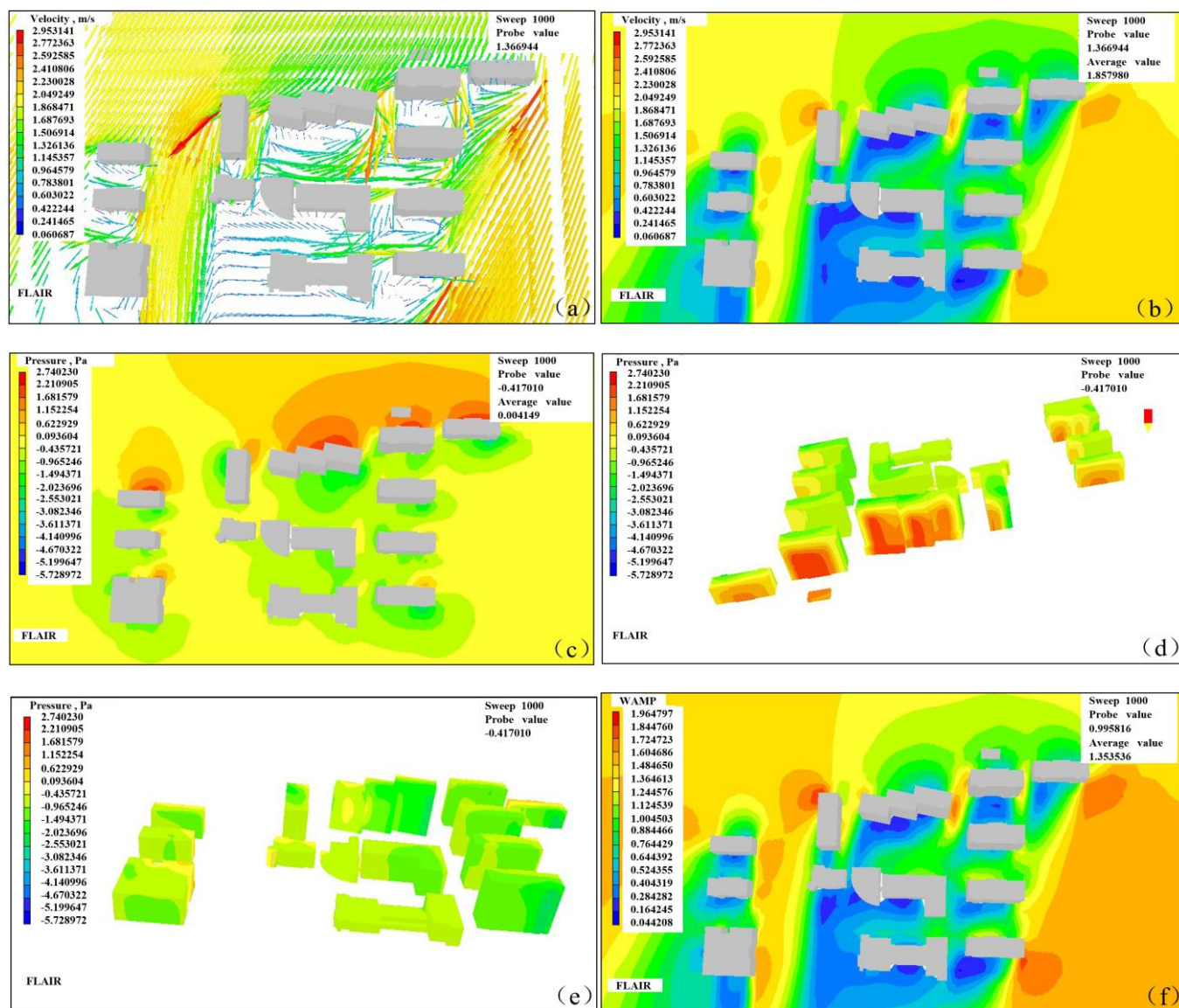


图 3 工况 2 风环境模拟结果图

结合图 3 (a) (b) 中的风速矢量图和云图，根据计算分析，可以得到在冬季工况下，1.5 m 高度处风速基本在 2.95 m/s 之内，主要人行通道处风速在 1.32~2.60 m/s 之间，风速均小于 5 m/s。分析图 3 (c) ~ (e) 可以发现冬季工况下，1.5 m 高度处（除迎风面之外的建筑物）建筑迎风面风压在 -0.44~1.15 Pa 之间，建筑背风面风压小于 -0.97 Pa，前后压差均小于 5 Pa 左右。此外，根据图 3 数据显示，冬季工况下，风场流线较为明显，无气流死区。在建筑南侧和东侧出现不明显漩涡区，但

是不影响建筑整体的风环境质量。与来流方向开阔地表风速相比，1.5 m 高度处区域内风速放大系数（图 3(f)）均小于 2，符合室外出行舒适度要求，满足 GB/T 50378-2014 的要求。

3.3 工况 3

基于模型建立，结合工况 3 的参数条件（过渡季风向为 N、风速为 2.0 m/s），模拟得出了低碳建筑在 1.5

m 处风速、风压以及放大系数, 如图 4 所示。

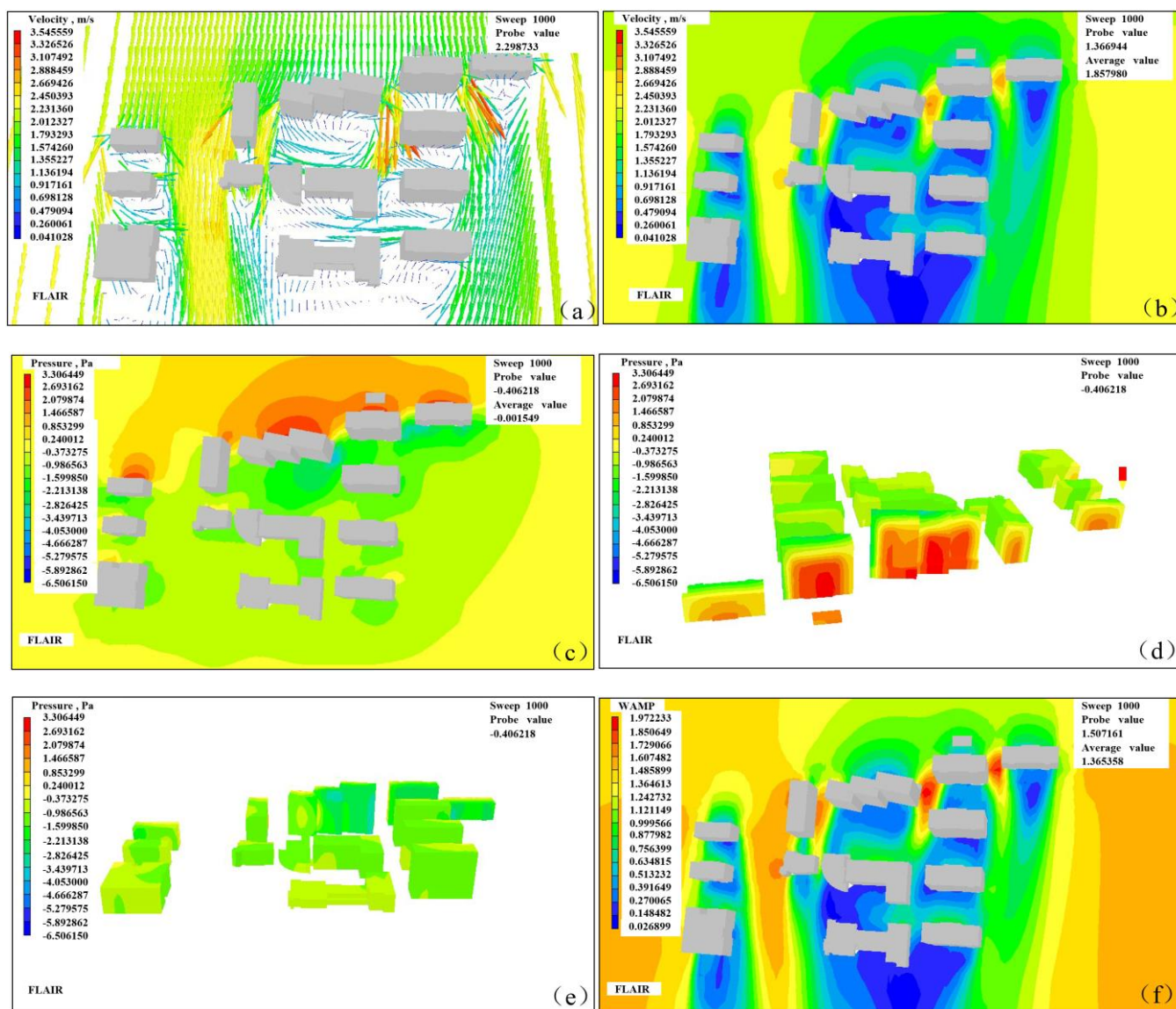


图 4 工况 3 风环境模拟结果图

由图 4 (a) (b) 可以发现, 在过渡季工况下, 风场流线较为明显, 无气流死区, 无明显漩涡区。1.5 m 高度处风速均小于 5 m/s, 风速基本维持在 3.3 m/s 之内, 南北向的人行通道处风速在 0.70~2.45 m/s 之间波动, 不会对人员活动造成影响。建筑周边风速都小于 2.67 m/s, 与来流方向开阔地表风速相比, 1.5m 高度处区域风速放大系数 (图 4 (f)) 均小于 2, 符合室外出行舒适度要求。此外, 分析图 4 (c) ~ (e) 可以发现 1.5 m 高度处区域的建筑迎风面风压在 0.24~1.47 Pa 之间, 1.5 m 高度处区域的低碳建筑背风面风压小于 -0.37 Pa, 前后压差有利于过渡季自然通风, 满足 GB/T 50378-2014 的要求。

4 结论

风环境作为一个影响低碳建筑环境的主要指标。通过软件对寒冷地区低碳建筑进行模拟研究。可以得出如下结论:

- (1) 所研究的低碳建筑在不同工况下人行高度处 (距离地面 1.5 m 高度处) 的风速小于 5 m/s, 风速放大系数小于 2, 满足舒适性要求和 GB/T 50378-2014 标准的要求。
- (2) 在冬季工况下, 建筑前后的风压差满足《绿色

建筑评价标准》 GB/T 50378-2014 中不高于 5 Pa 的要求。

(3)在夏季、过渡季的工况下,人行高度处主要人员活动区无明显漩涡,自然通风情况良好。

参考文献

- [1] 贾彬,王汝恒.风洞试验在我国建筑工程中的应用简介[J].四川建筑科学研究,2006,(03):39-41.
- [2] 闫渤文,魏民,鄢乔, et al. 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.
- [3] 袁敬诚,袁菁,苗漪.山地条件多层建筑布局对风环境的影响效应[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(02):330-7.
- [4] 刘若斐,程骏.高层建筑平面排布方式与风环境关系的数值模拟[J].建筑结构,2021,51(S1):1757-62.
- [5] 水滔滔,刘京,肖荣波, et al. 底部架空住区风环境风洞试验研究[J].建筑科学,2017,33(02):20-6.
- [6] XIAOYU Y, GRACE D, XIAOJUN H, et al. Developing planning indicators for outdoor wind environments of high-rise residential buildings [J]. Applied Physics & Engineering, 2016, 17 (5): 378-88.
- [7] 胡一东,庄智,余元波, et al. 绿色建筑风环境模拟技术要点敏感性分析[J].建筑科学,2016,32(08):7-12+32.
- [8] 谭献良,管昌生,卢艺伟, et al. 基于 BIM 模型的建筑风环境可靠性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(12):4732-7.
- [9] QING Z X, TAO W J, QUN W Y, et al. Wind suitability in site analysis of coastal concave terrains using computational fluid dynamics simulation: a case study in East Asia [J]. Applied Physics & Engineering, 2017, 18 (9).
- [10] 龚晨,汪新.建筑布局对住宅小区风环境的影响研究[J].建筑科学,2014,30(07):6-12.
- [11] 石峰,金伟.福州“多进天井式”民居天井几何形态对建筑风环境的影响研究——以琴江村“黄恩禄故居”为例[J].建筑学报,2016,(S1):18-21.
- [12] 郭昊翔,易长文,邓孟仁.竖井空间对医用建筑风环境影响的模拟分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(01):39-47.
- [13] 王国荣,张植.基于 Ladybug+phoenics 的寒冷地区幼儿园建筑室外风环境模拟研究[J].甘肃科学学报,2021,33(01):116-21.
- [14] 朱泽辉,聂欣,廖海波.基于低雷诺数 $\kappa\text{-}\epsilon$ 模型冲击射流传热的数值模拟[J].水电能源科学,2021,39(04):157-60+203.
- [15] E L B. Numerical Computation of Convective Heat Transfer in Complex Turbulent Flows: Time to Abandon Wall Functions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27 (9): 1485-91.
- [16] 张采.几种梯度风公式的比较[J].新疆师范大学学报(自然科学版),1990,(01):65-71.
- [17] 庄智,余元波,叶海, et al. 建筑室外风环境 CFD 模拟技术研究现状[J].建筑科学,2014,30(02):108-14.