

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-455-12

基于 CFD 模拟的 翻板遮阳建筑群风环境的影响研究

邱龙辉 陶求华 严华夏

(集美大学海洋装备与机械工程学院 厦门 361021)

【摘要】 研究聚焦配置可调节外立面构件的多层建筑群的风环境特性,以遮阳翻板为研究对象,系统探讨了遮阳翻板旋转角度与街谷高宽比对街道峡谷气流、风速分布、建筑通风量及空气龄的综合影响。通过计算流体力学数值模拟,并结合已有实验数据验证模型精度。研究发现,当街谷高宽比为 1 时,遮阳翻板在小幅旋转的情况下,对流体流动的干扰较小,气流能够顺畅进入上游建筑。然而,随着遮阳翻板旋转角度的增加,流线变得更加复杂,涡旋和弯曲现象增多,导致流速降低并影响建筑群的通风效率。当街谷高宽比增至 1.5 时,建筑群的风环境变得更加复杂,流线在建筑间的分布趋于密集,局部风速增大,从而产生涡旋并影响通风效果。其次,遮阳翻板旋转角度对风速分布有显著调控作用。随着旋转角度的增加,低风速区间的占比上升,整体风速下降。此外,街谷高宽比的增加对上游建筑的通风量影响较小,但对中间建筑的通风量产生了显著负面影响,尤其是在高楼层。下游建筑的通风量也呈现下降趋势,但影响较为温和。空气龄分析结果表明,在上游建筑中,空气龄随楼层升高而逐渐减少,反映出良好的空气流通性;而在中间建筑中,高楼层的空气龄显著增大,表明通风不良;下游建筑的空气龄变化较小,维持相对稳定。研究通过结合 CFD 数值模拟与参数化分析方法,深入揭示了遮阳翻板旋转角与街谷高宽比的协同作用对建筑群风环境的影响规律,为多层建筑群风环境优化提供了科学依据,并对建筑立面设计和建筑群间距设置具有重要的指导意义。

【关键词】 自然通风; 建筑群; 遮阳翻板; CFD 数值模拟; 街谷高宽比

中图分类号 TU834.1 文献标志码 A

Optimization Study on Wind Environment of Building Complex Based on CFD Simulation of Louvers Design Parameters

Qiu Longhui Tao Qiuhua Yan Huaxia

(School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, 361021)

【Abstract】 This study focuses on the wind environment characteristics of a multi story building complex with adjustable facade components. The study takes the sunshade flap as the research object and systematically explores the comprehensive effects of the rotation angle of the sunshade flap and the height to width ratio of the street canyon on the airflow, wind speed distribution, building ventilation volume, and air age in the street canyon. By conducting numerical simulations of computational fluid dynamics and verifying the accuracy of the model with existing experimental data. The research results indicate that when the height to width ratio of the street valley is 1, the interference of the sunshade flap on fluid flow is relatively small with small rotation, and the

基金项目: 福建省自然科学基金(编号: 2024J01110); 厦门市科技补助项目资助(编号: 2024CXY0309)

作者简介: 邱龙辉(2000-), 男, 硕士生, 从事建筑节能研究, E-mail: 2410842304@qq.com

通讯作者: 陶求华(1981-), 男, 副教授, 博士, 从事制冷空调节能研究, E-mail: qhtao@jmu.edu.cn

收稿日期: 2025-03-20

airflow can smoothly enter the upstream building. However, with the increase of the rotation angle of the sunshade flap, the streamline becomes more complex, vortex and bending phenomena increase, resulting in a decrease in flow velocity and affecting the ventilation efficiency of the building complex. When the height to width ratio of the street valley increases to 1.5, the wind environment of the building complex becomes more complex, and the distribution of streamlines between buildings tends to be dense. Local wind speeds increase, resulting in vortices and affecting ventilation effectiveness. Secondly, the rotation angle of the sunshade flap has a significant regulatory effect on the distribution of wind speed. As the rotation angle increases, the proportion of low wind speed range increases and the overall wind speed decreases. In addition, the increase in the height to width ratio of the street valley has a relatively small impact on the ventilation volume of upstream buildings, but has a significant negative impact on the ventilation volume of middle buildings, especially in high-rise buildings. The ventilation volume of downstream buildings is also showing a downward trend, but the impact is relatively mild. The air age analysis results indicate that in upstream buildings, the air age gradually decreases with the increase of floors, reflecting good air circulation; In the middle building, the air age on the high floors significantly increases, indicating poor ventilation; The air age of downstream buildings changes relatively little and remains relatively stable. This study combines CFD numerical simulation and parametric analysis methods to deeply reveal the synergistic effect of the rotation angle of the sunshade flap and the height to width ratio of the street valley on the wind environment of the building complex. It provides a scientific basis for optimizing the wind environment of multi story building complexes and has important guiding significance for the design of building facades and the setting of building spacing.

【Keywords】 Natural ventilation; Building cluster; Louvers; CFD simulation; The height to width ratio of the street canyon

0 引言

建筑物通常依赖自然对流通风来维持室内环境的舒适度并排除污染物^[1-3], 同时自然通风还能有效降低建筑能耗, 实现被动冷却^[4-6]。然而, 建筑的自然通风效果受到多种因素的综合影响, 包括建筑立面设计、街谷高宽比以及局地气候环境等^[7]。建筑外遮阳翻板作为一种可调节的遮阳构件, 既能有效减少太阳辐射进入室内, 改善室内光环境^[8-10], 也会因其对气流的阻碍作用而改变建筑立面的周边流场, 从而对室内外的空气流通产生影响^[11]。

随着城市化的快速推进, 建筑密度不断增大, 建筑自然通风的能力不仅取决于单体建筑设计, 还受到周围建筑群布局模式的显著影响^[12-14]。Mei 等^[15]研究了建筑群的布局, 发现它会影响建筑物周围的空气年龄、通风速率和动量交换率。Tominaga 等人^[16]的研究表明, 在周围建筑存在的情况下, 目标建筑室内的湍流动能相较于孤立状态减少了 43%, 同时空气流速也降低了约 30%。Hang^[17]针对具有不同纵横比的街道峡谷中测量风速, 研究发现较窄的街道峡谷内对流通风弱, 街道纵横比从 1 增大到 3 时, 峡谷内的风速降低了 55%。然而, 目前大多数研究将建筑群中单体建筑的外立面视为平面, 未考虑立面微气候变化对室内外气流交换的影

响。

外遮阳翻板作为可调节的立面构件, 除了调节太阳辐射的入射率, 还能通过改变气流路径来影响建筑的室内外风环境。Tao 等人^[18]将研究焦点转向了自然通风双层立面系统, 他们发现当百叶窗角度配置为 45°时, 能够有效提升系统的通风量, 最大增幅可达 14.4%。这一发现为双层立面系统的通风设计提供了重要参考。此外, Zheng 等人^[19]还探讨了百叶窗位置对多层建筑室内空气质量的影响。他们指出, 在迎风侧遮阳最差的情况下, 感染风险由 7.82% 上升至 26.17%, 而背风侧则由 7.89% 升至 22.52%。这一发现为多层建筑的百叶窗设计提供了健康风险方面的考量。另一方面, Jiang^[20]的研究则关注了风向变化对不同楼层通风性能的影响。他发现, 当风向角从 0°增至 60°时, 百叶窗与非百叶窗建筑间的空气置换效率差异显著减小, 从约 11% 降至 2%。然而, 大多数研究仅针对孤立建筑, 缺乏对建筑群复杂气流模式下可调节遮阳立面对自然通风潜力的深入研究^[21-23]。

因此, 本文研究了街谷高宽比和遮阳翻板对 3×3 矩阵式多层建筑群自然通风的影响, 采用经过验证的流场数值模拟方法, 构建了带遮阳翻板的室内外气流耦合模型。通过分析两种不同街谷高宽比条件下, 外部遮阳百叶窗角度对街谷通风性能和房

间内局部风环境的影响, 评估了房间通风量和空气龄的变化, 旨在深入探讨街谷高宽比、遮阳翻板角度等设计参数与建筑群自然通风效果之间的关系。

1 研究方法

本文采用 CFD 仿真模拟软件建立的遮阳建筑群模型, 并采用将数值模拟结果与前人的实验数据比较的方法对单个房间模型室内外风速进行验证。

1.1 控制方程

CFD 模拟技术已广泛用于预测建筑环境中的气流场。为了评估遮阳翻板对室内外气流特性的影响, 本文采用稳态雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (RANS) 来求解气流场, 这种方法在精度与计算效率之间取得了良好的平衡。对于不可压缩流动, 时间平均控制方程的一般形式如式 (1) 所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi) + \nabla \cdot (\bar{u}_\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S_\varphi \quad (1)$$

式中: φ 表示不同的标量, 包括三个速度分量 u_x 、 u_y 和 u_z , 湍流动能 k , 耗散率 ε , 平均速度 \bar{u} , 有效扩散系数 Γ_φ 以及源项 S_φ 。在数值模拟中, 控制方程通过有限体积法 (FVM) 被离散化为代数形式。

1.2 几何模型

为了研究可调节遮阳立面对自然通风的影响, 本研究选取了一个 3×3 的建筑群体作为对象, 并采用 1:15 的比例缩小构建了一个五层建筑模型, 以简化计算。建筑群中每栋建筑的间距均设为 X , 尺寸为长 9 米、宽 4.5 米、高 15 米, 房间的窗口尺寸为高 1.5 米、宽 2.4 米。每层分为 L 单元和 W 单元, L 单元的北侧外墙与 W 单元的南侧外墙各设置一个窗户, 单元之间的内墙上装有内门以促进空气流通。W 单元的门窗尺寸如图 1 (b) 所示。

本研究采用了 Tao^[24]提出的室外梭形百叶设计作为遮阳组件的原型。在每个遮阳立面上安装了 48 个百叶窗条, 这些百叶窗被固定在 W 单元南侧窗户外部, 具体布置见图 1 (c)。为了便于分析, 建筑群的单元按楼层和朝向进行编号, 如图 2 所示, W1-W5 代表南侧单元的楼层编号, 从一楼到五楼, L1-L5 则代表北侧单元对应楼层的编号。

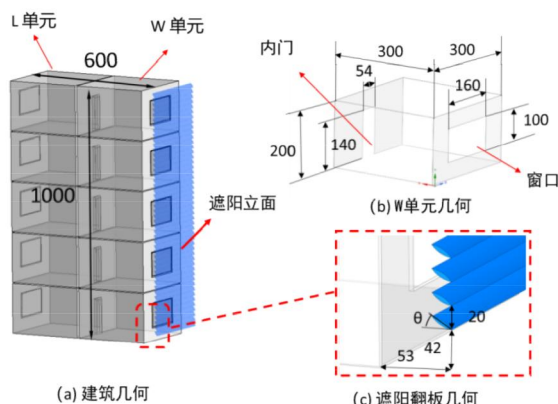


图 1 单体建筑和百叶窗立面局部几何形状 (单位 mm)

Fig.1 Local geometry of single building and louver facade (Unit mm)

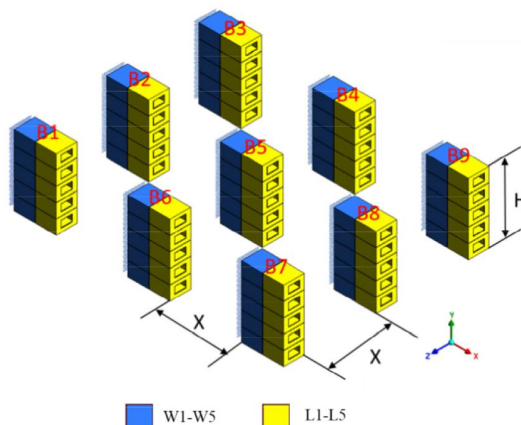


图 2 带遮阳翻板的建筑群尺寸

Fig.2 Dimensions of the building cluster with louver facade

为了研究遮阳建筑群在开窗状态下的建筑内外气流分布, 进而求解室内外的风环境, 本研究建立了室内外气流耦合模型, 并假设气流为不可压缩流体。在通风建筑中, 室内空气质量得到守恒, 通过对各开口处法向速度的积分, 可以计算出房间的自然通风量, 计算方法如式 (2) 所示。

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{N_y} \sum_{n=1}^{N_z} |U_{m,n}| \Delta y_m \Delta z_n \quad (2)$$

式中: Δy_m 和 Δz_n 分别为在 y 和 z 方向上, 跨越一个网格单元所需的距离; $U_{m,n}$ 为在网格上的平均法向速度, m/s; N_y 和 N_z 为在 y 和 z 方向上的网格编号。

1.3 计算域和网格划分

图 3 展示了配备翻板遮阳的九栋建筑外部流场的计算区域设置。计算域的尺寸确定遵循相关行业标准和指导原则。具体而言, 建筑高度记为 h_0 ,

计算域的顶部边界设定在建筑屋顶上方 $5h_0$ 处，入口边界位于建筑迎风面前方 $5h_0$ ，出口边界设在建筑背风面后方 $15h_0$ ，而侧面边界则与建筑侧壁保持 $5h_0$ 的距离。这些设置确保了计算域的合理性，且阻塞率控制在 5% 以下。

对于近壁网格的划分，建筑墙壁、地面以及遮阳翻板上的最小网格高度为 0.0003m （即 $0.0006h_0$ ），保证了 y^+ 值在 5 以下且接近 1，从而使得所有表面的近壁边界层可以通过增强的壁面函数进行精确模拟。最终，计算域生成的网格总数

约为 1800 万个，包括全局网格和局部加密网格，具体分布如图 4 所示。

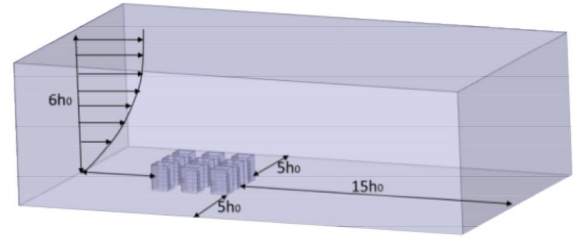
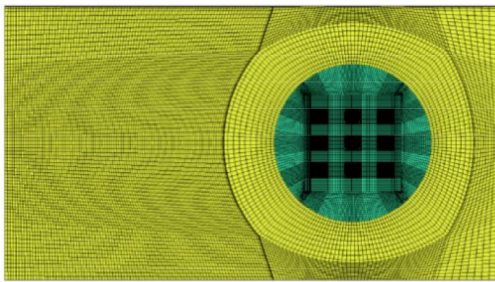
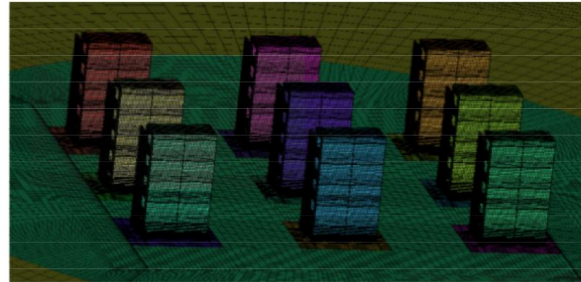


图 3 计算域的尺寸

Fig.3 Dimensions of the computational domain



(a) 全局网格尺寸



(b) 局部网格尺寸

图 4 全局和局部网格分辨率

Fig.4 Global and local mesh resolution

1.4 边界条件

计算域的边界条件如表 1 所示。计算域的入口被定义为接近气流的速度入口，它遵循幂律剖面。气流速度 U 和湍流强度 I 由地形类别的环境参数定义。接近气流的参考速度 U_{ref} 为 5.0m/s 。参考高度 h_0 是建筑物高度。 α 是描述表面粗糙度的幂律系数，对于郊区地形，该系数为 0.27 。动能 k 和耗散率 ε 是湍流模型的参数。常数 C_μ 设置为 0.09 。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

| 位置 | 方程和类型 |
|----|--|
| 入口 | $U_{(y)} = U_{ref} \left(\frac{y}{h_0} \right)^\alpha$ (3) |
| | $I_{(y)} = 0.1 \left(\frac{y}{h_0} \right)^{-\alpha-0.05}$ (4) |
| | $k_{(y)} = [U_{(y)} I_{(y)}]^2$ (5) |
| | $\varepsilon_{(y)} = C_\mu^{0.5} k_{(y)} \frac{U_{(y)}}{h_0} \alpha \left(\frac{y}{h_0} \right)^{\alpha-1}$ (6) |

续表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

| 位置 | 方程和类型 |
|---------------|--|
| 出口 | $\frac{\partial(\mu_x, \mu_y, \mu_z, k, \varepsilon)}{\partial x} = 0$ (7) |
| 顶面 | $u_y = 0$ |
| | $\frac{\partial(\mu_x, \mu_z, k, \varepsilon)}{\partial x} = 0$ (8) |
| | $\frac{\partial(\mu_x, \mu_z, k, \varepsilon)}{\partial z} = 0$ (9) |
| 侧面 | $u_z = 0$ |
| | $\frac{\partial(\mu_x, \mu_y, k, \varepsilon)}{\partial x} = 0$ (10) |
| 建筑表面、百叶窗表面和地面 | $\frac{\partial(\mu_x, \mu_y, k, \varepsilon)}{\partial y} = 0$ (11) |
| | Non-slip for wall shear stress, enhanced wall treatment |

1.5 数值模拟验证

通过对在自然通风下的室内外耦合气流场建筑进行模型的数值验证。将数值模拟验证结果跟前

人的实验数据进行对比, 来确保本研究数值模拟的准确。

将数值模拟结果与 Jiang^[25]的实验数据比较, 参考实验设置在风洞中, 建筑物为立方体且具有迎风开口, 如图 5 (a) 所示建筑的长宽高均为 $H_0=250\text{mm}$, 开口处在建筑立面的中心线上。门的宽度和高度分别为 $0.336H_0$ 和 $0.5H_0$, 建筑物高度处的参考速度设置为 8.2m/s 。计算域大小如图 4 所

示, 边界条件的设置与表 1 相同, 选取了五根与实验相同位置的线提取线上的速度。模拟结果与实验数据的比较 U/U_{ref} 如图 5 (b) - (e) 所示, 数值模拟结果得到的无量纲速度分布与实验数据相差较小, 无量纲速度的绝对偏差为 0.094 , 表明数值模拟对建筑室内外的气流场的预测精度达到了要求, 用数值模拟对自然通风下的室内外耦合气流场建筑进行研究是可靠的。

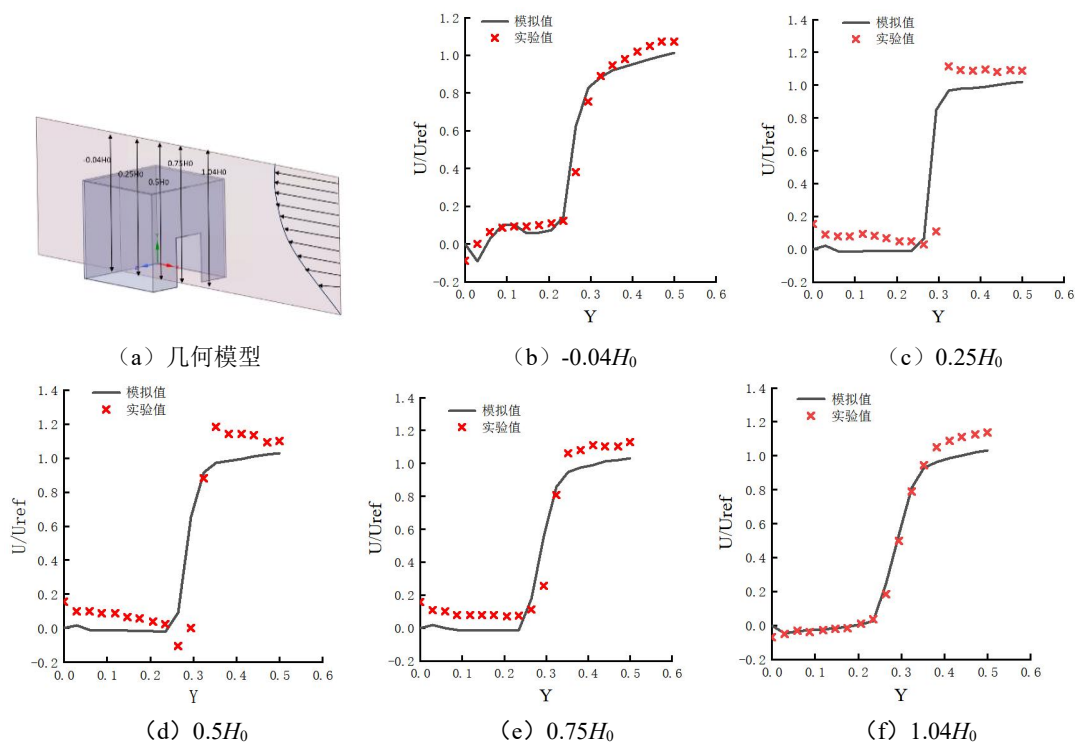


图 5 具有迎风开口的建筑物的无量纲速度分布的验证

Fig.5 Validation of the dimensionless velocity distribution for the building with a windward opening

2 结果和讨论

当街谷高宽比增大时, 随着建筑之间宽度的缩小, 建筑群的整体形态变得更加紧凑, 风流在通过建筑群时会更加集中, 导致建筑群通道内的风速增大, 而室内风速降低。这种风速的变化将直接影响流线的分布, 使得流线在建筑群间的流动变得更加复杂和难以预测。

2.1 气流特性

当街谷高宽比 (H/X) 维持在 1 时, 遮阳翻板在小幅旋转的情况下, 对上游建筑室内外的流体流动产生的干扰相对较小。此时, 流线呈现出一种自然流畅且相对简单的状态, 气流能够毫无阻碍地进入上游建筑室内。

$\theta=0^\circ$ 情况下, 建筑室内最大风速出现在上游建筑的第四, 五层内门处, 风速达到了 4.2m/s 。然而, 随着遮阳翻板旋转角度的逐步增加, 其对流体流动的阻碍效应也愈发明显, $\theta=60^\circ$ 时, 上游建筑的室内最大风速为 3m/s , 下降了 28.5% 。流线在遮阳翻板附近开始变得错综复杂, 弯曲与涡旋现象层出不穷。这种复杂性的提升不仅改变了流体的行进路径, 还可能对建筑群的风环境产生深远的影响。涡旋的形成, 作为遮阳翻板旋转角度增大后的典型流体结构变化, 它们在建筑群内外构筑了多个小范围的流体循环, 进一步对建筑群的通风效果和舒适度造成了影响。

当街谷的高宽比 (H/X) 增大至 1.5 时, 建筑

群的整体形态变得更加紧凑。气流在穿过建筑群时可能会更加集中，导致某些区域的风速反而有所增大。例如在 $\theta=60^\circ$ 时，随着街谷高宽比的增大，在上游建筑和中间建筑的背风区出现了明显的风速增大现象，此时街谷内最大风速为 1.2m/s，增大了 30.2%；平均风速为 0.56m/s，增大了 34.9%。这种风速的变化将直接影响流线的分布，使得流线在建筑群间的流动变得更加复杂且难以捉摸。

遮阳翻板作为建筑群的一部分，其旋转角度的变化在此时对流体流动产生的影响更为敏感。即使

遮阳翻板旋转角度较小，由于建筑宽度的缩小，流线在建筑群间的分布也已经变得更为紧凑和密集。这导致在某些区域出现气流拥堵或涡旋现象，进一步对建筑群的通风效果和舒适度造成不利影响。

随着遮阳翻板旋转角度的进一步增大，其对流体流动的阻碍作用愈发显著。在建筑宽度缩小的情况下，遮阳翻板的旋转更直接地改变流线在建筑群间的分布。流线在遮阳翻板附近可能出现更为剧烈的弯曲和涡旋，这些涡旋不仅加剧了建筑群间的湍流强度，还可能对建筑群的稳定性和安全性构成潜在威胁。

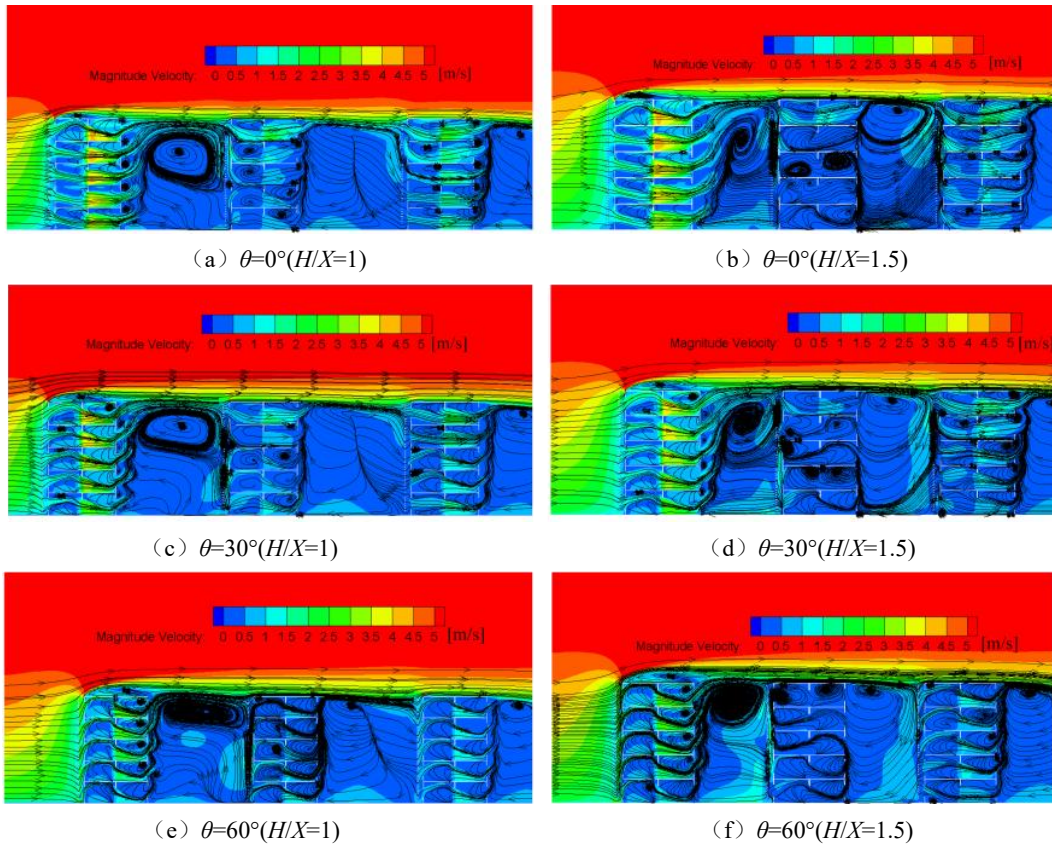
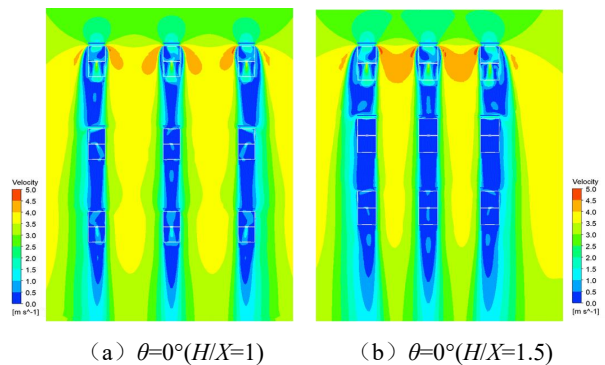


图 6 中间列建筑在三种不同遮阳条件下不同建筑距离下的流线图 (左 $H/X=1$, 右 $H/X=1.5$)

Fig.6 Streamline diagram of the middle building complex under three different shading conditions at different distances (left $H/X=1$, right $H/X=1.5$)

综上所述，当街谷高宽比 (H/X) 变为 1.5 时，建筑群的风环境和流动特性将发生显著变化。遮阳翻板旋转角度对室内外流线的影 响也变得 更加复杂和敏感。因此，在建筑设计过程中，需要综合考虑街谷的高度、宽度的变化、遮阳翻板的旋转角度以及建筑群的具体布局和环境条件等多种因素，来实现建筑群通风效果和舒适度的最优化。



(a) $\theta=0^\circ(H/X=1)$ (b) $\theta=0^\circ(H/X=1.5)$

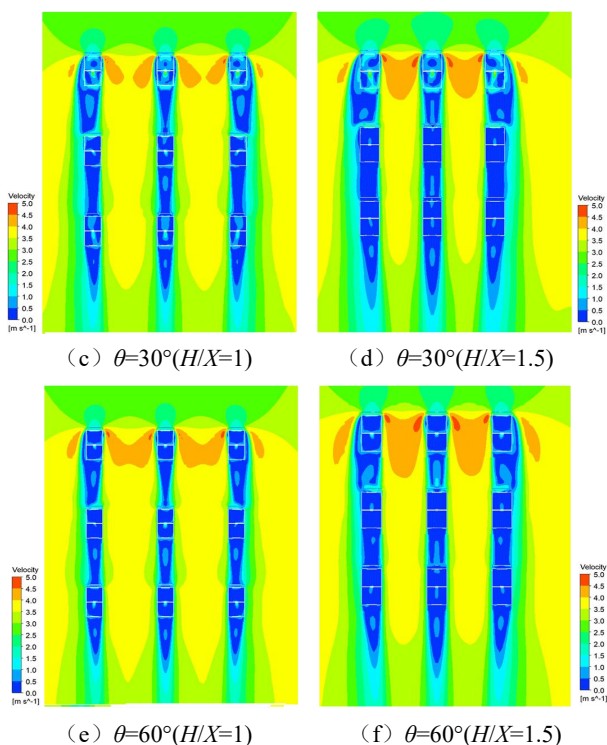


图 7 不同街谷高宽比下 θ 对行人高度处流场的影响 (左 $H/X=1$, 右 $H/X=1.5$)

Fig.7 The influence of θ on the flow field at pedestrian height under building height to width ratio (left $H/X=1$, right $H/X=1.5$)

图 7 是 0° 风向角, 两种不同间距下, 三种遮阳工况的建筑群第一层行人高度处速度云图对比, 图 (a) - (c) 分别显示了遮阳翻板倾角为 0° 、 30° 和 60° 的遮阳工况时, 两种不同街谷高宽比下行人

表 2 速度区比例和平均速度

Table 2 Proportion of speed zone and average speed

| 建筑群类型 | 0-1m/s | 1-4m/s | 4-5m/s | 平均风速 m/s |
|----------------------------|--------|--------|--------|----------|
| $\theta=0^\circ, H/X=1$ | 27% | 70% | 3% | 2.52 |
| $\theta=0^\circ, H/X=1.5$ | 35% | 59% | 7% | 2.31 |
| $\theta=30^\circ, H/X=1$ | 27% | 68% | 5% | 2.62 |
| $\theta=30^\circ, H/X=1.5$ | 36% | 55% | 9% | 2.31 |
| $\theta=60^\circ, H/X=1$ | 27% | 65% | 8% | 2.67 |
| $\theta=60^\circ, H/X=1.5$ | 37% | 50% | 12% | 2.37 |

首先, 关于街谷高宽比 (H/X) 的变化对风速分布的影响, 我们观察到在遮阳翻板旋转角 θ 保持不变的条件下, 随着街谷高宽比从 1 增加至 1.5, 风速分布发生了显著变化。具体而言, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 低风速区间 ($0-1\text{m/s}$) 的占比从 27%增加至 35%,

高度处建筑群室内外流场的分布情况。当气流从开阔区域进入狭窄通道时, 会导致风速明显增大, 形成“狭管效应”。其中, 受“狭管效应”最为严重的是 60° 旋转角遮阳建筑群, 其次是 30° 旋转角遮阳建筑群, 这是由于风在进入上游建筑室内时受到了遮阳翻板的阻碍, 导致上游建筑的迎风窗口有效开口面积随着遮阳翻板旋转角的增大而减小, 受到阻碍的风部分进入上游建筑室内, 而其余被迫转向建筑群横向通道内, 增大了通道内的流速。

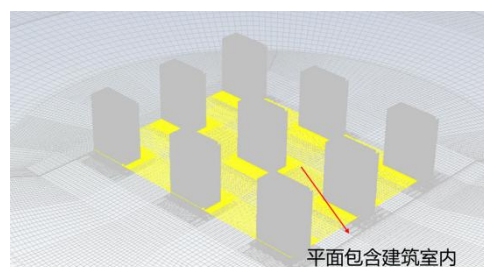


图 8 测速区域大小

Fig.8 Size of speed measurement area

为了量化街谷高宽比和翻板旋转角对建筑群内第一层行人高度处风速的影响, 在建筑群内建立行人高度处的局部平面, 该平面包括建筑室内, 范围大小如图 8 所示, 并将风速设定为三个范围, 低速为 $0-1\text{m/s}$, 中速为 $1-4\text{m/s}$, 高速为 $4-5\text{m/s}$, $H/X=1$ 的平面大小为 10.95m^2 , $H/X=1.5$ 的平面大小为 6.956m^2 。

将各类建筑群及室内区域的风速范围面积占比及平均风速进行统计, 结果如表 2 所示。

中等风速区间 ($1-4\text{m/s}$) 的占比从 70%下降至 59%, 高速风速区间 ($4-5\text{m/s}$) 的占比从 3%上升至 7%, 平均风速从 2.52m/s 降低至 2.31m/s , 下降了 8.33%。类似地, 当 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时, 低风速区间的占比分别增加至 36%和 37%, 中等风速区间的占比分别下

降至 55%和 50%，高风速区间的占比分别上升至 9%和 12%，平均风速则分别下降了 11.83%和 5.91%。表明街谷高宽比的增加在一定程度上阻碍了风流的顺畅通过，从而降低了建筑群内的平均风速。

其次，关于遮阳翻板旋转角 θ 的变化对风速分布的影响，在街谷高宽比 (H/X) 保持不变的条件下进行了分析。当 $H/X=1$ 时，随着遮阳翻板旋转角从 0° 增加至 60° ，低风速区间的占比相对稳定，保持在 27%左右。然而，中等风速区间的占比则呈现出先减后增的趋势，从 70%降至 65%，再回升至 68%，而高风速区间的占比则持续上升，从 3%增至 8%。这些变化导致平均风速在旋转角为 30° 时达到最高值 2.62m/s，而在 0° 和 60° 时则相对较低，分别为 2.52m/s 和 2.67m/s。当 $H/X=1.5$ 时，虽然风速分布的具体数值有所不同，但整体趋势与 $H/X=1$ 时相似。这些结果表明，遮阳翻板的旋转对风流的分布具有显著的调控作用，尤其是在特定旋转角下能够优化建筑群的风环境。

2.2 建筑室内通风

图 9 展示了建筑群在不同风向角和遮阳条件下 B1-B9 建筑群的通风量变化情况，因为同一层前后房间共用同一个门且窗口面积一样，所以此处 B1-B9 分别选择其建筑 W 列 1-5 层房间通风量之和用于评估独栋建筑的整体通风情况。通过对比不同风向角和翻板旋转角下的通风量，体现了这些变量对建筑内部空气流通效率的重要影响。

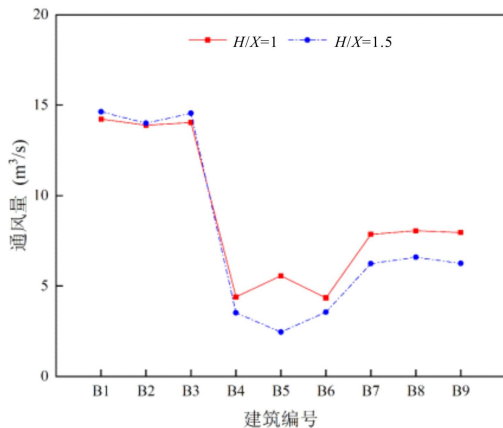


图 9 $\theta=60^\circ$ 时不同街谷高宽比的建筑群通风量比较

Fig.9 Comparison of ventilation volume of building clusters with different building spacing at $\theta=60^\circ$

上游建筑在 $H/X=1$ 的条件下，通风量普遍维持在较高水平，B1 达到 $14.23\text{m}^3/\text{s}$ ，B2 为 $13.91\text{m}^3/\text{s}$ ，B3 则为 $14.04\text{m}^3/\text{s}$ 。当街谷高宽比调整至 $H/X=1.5$

时，B1 的通风量轻微提升至 $14.64\text{m}^3/\text{s}$ ，增幅约为 2.9%；B3 的通风量增大至 $14.30\text{m}^3/\text{s}$ ，增幅约为 1.8%；B2 的通风量则基本保持稳定，维持在 $13.90\text{m}^3/\text{s}$ 左右，变化幅度小于 0.1%。这一现象表明，街谷高宽比的增加对上游建筑的通风量影响有限，但整体呈现上升趋势，平均增长率约为 1.5%。

中间建筑在两种街谷高宽比下的通风量均处于较低水平，但变化显著。在 $H/X=1$ 时，B4 的通风量为 $4.39\text{m}^3/\text{s}$ ，B5 为 $5.57\text{m}^3/\text{s}$ ，B6 为 $4.35\text{m}^3/\text{s}$ 。然而，当街谷高宽比增加至 $H/X=1.5$ 时，B4 的通风量降至 $3.52\text{m}^3/\text{s}$ ，降幅约为 19.8%；B5 的通风量更是大幅下降至 $2.46\text{m}^3/\text{s}$ ，降幅高达 55.8%；B6 的通风量也降至 $3.56\text{m}^3/\text{s}$ ，降幅约为 18.2%。表明街谷高宽比的增加对中间建筑的通风量产生了显著的负面影响，平均下降率达到了约 31.3%。

下游建筑在两种街谷高宽比下的通风量表现相对平稳，但仍呈现下降趋势。在 $H/X=1$ 的条件下，B7 的通风量为 $7.86\text{m}^3/\text{s}$ ，B8 为 $8.06\text{m}^3/\text{s}$ ，B9 为 $7.96\text{m}^3/\text{s}$ 。随着街谷高宽比增加至 $H/X=1.5$ ，B7 的通风量降至 $6.24\text{m}^3/\text{s}$ ，降幅约为 20.9%；B8 的通风量降至 $6.59\text{m}^3/\text{s}$ ，降幅约为 18.2%；B9 的通风量则降至 $6.25\text{m}^3/\text{s}$ ，降幅约为 21.5%。尽管下降幅度相对较小，但结果仍表明街谷高宽比的增加对下游建筑的通风量产生了一定的不利影响，平均下降率约为 20.2%。然而，相较于中间建筑，其影响程度显然较小。

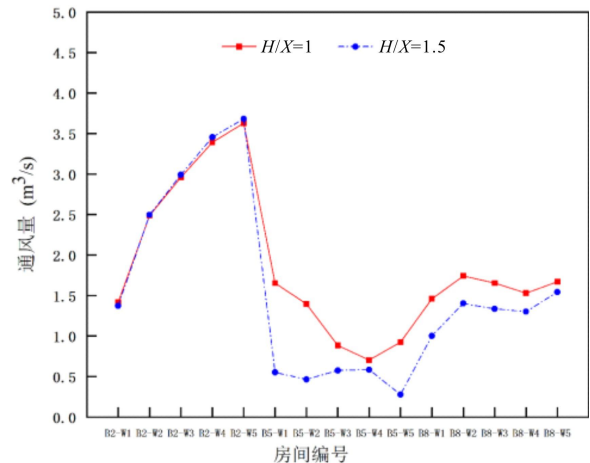


图 10 $\theta=60^\circ$ 时不同街谷高宽比下三栋楼中不同楼层房间通风量

Fig.10 Ventilation rates of rooms on different floors in the middle building of the lower three buildings at different building spacings of $\theta=60^\circ$

图 10 展示了在遮阳翻板旋转角 $\theta=60^\circ$ 的条件下, 位于建筑群中间列的 B2, B5, B8 三栋建筑不同楼层房间的通风量受到街谷高宽比条件的影响。

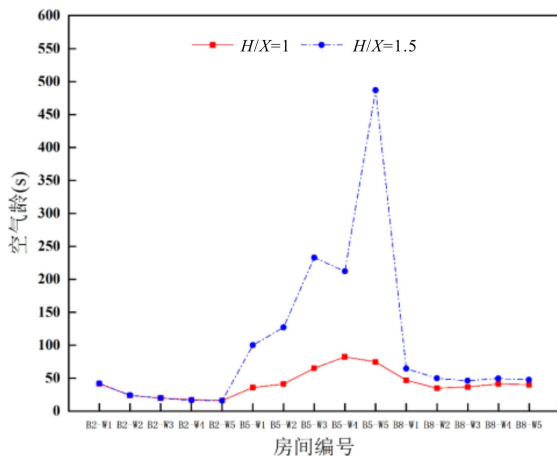
研究结果显示, 上游建筑 B2 展现出卓越的通风性能, 其房间通风量随楼层上升而显著增加。在 $H/X=1$ 的条件下, 从 1 楼至 5 楼, 通风量从 $1.42\text{m}^3/\text{s}$ 提升至 $3.63\text{m}^3/\text{s}$, 增长幅度高达 155%。当街谷高宽比扩大至 $H/X=1.5$ 时, 这一增长趋势更加显著, 通风量从 1 楼的 $1.37\text{m}^3/\text{s}$ 增加至 5 楼的 $3.68\text{m}^3/\text{s}$, 增长幅度达到 169%, 且各楼层通风量均略高于 $H/X=1$ 时的对应值, 增幅在 2%至 3%之间。

相比之下, 中间建筑 B5 的通风性能明显较弱。其房间通风量不仅整体偏低, 而且在楼层间存在显著波动。特别是在 $H/X=1.5$ 的条件下, 通风量随楼层上升而急剧下降, 从 1 楼的 $0.55\text{m}^3/\text{s}$ 降至 5 楼的 $0.28\text{m}^3/\text{s}$, 下降幅度高达 49%, 表明 B5 建筑在高楼层面临的严重通风不良。

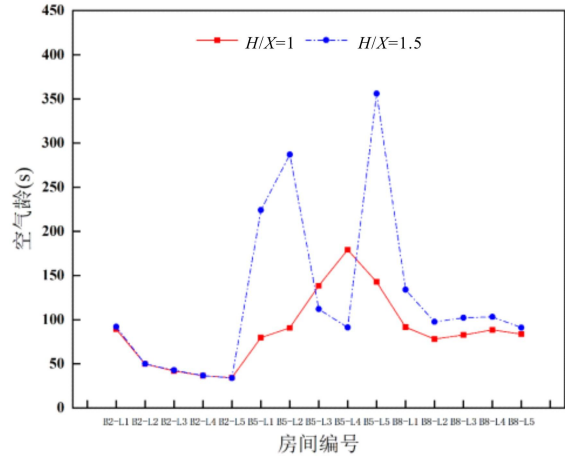
下游建筑 B8 的通风量则处于 B2 和 B5 之间, 表现出相对稳定的特性。在 $H/X=1$ 的条件下, B8 建筑的通风量在 $1.46\text{m}^3/\text{s}$ 至 $1.67\text{m}^3/\text{s}$ 之间波动, 楼层间差异较小。当街谷高宽比调整为 $H/X=1.5$ 时, 通风量在 $1\text{m}^3/\text{s}$ 至 $1.54\text{m}^3/\text{s}$ 之间变化, 同样保持了较为平稳的趋势, 但整体通风量较 $H/X=1$ 时有所下降, 下降幅度在 11%至 22%之间。

研究表明上游建筑 B2 的通风性能显著优于中间建筑 B5 和下游建筑 B8, 而 B5 建筑在高楼层的通风条件最差。

2.3 房间空气龄



(a) W 列房间



(b) L 列房间

图 11 $\theta=60^\circ$ 时不同街谷高宽比下三栋建筑不同楼层房间的空气龄对比

Fig.11 Air age of rooms on different floors in three middle buildings with different height to width ratios of $\theta=60^\circ$

在 CFD 软件 FLUENT 中, 可以通过用户自定义标量 (UDS) 功能来设定空气龄标量的传输方程^[26]。

$$\frac{\partial(\rho u_x \tau)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y \tau)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z \tau)}{\partial z} = \left(\frac{\mu_l}{\sigma_l} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla^2 \tau + S_\tau \quad (12)$$

式中: τ 为局部空气龄, s; u_x 、 u_y 、 u_z 为平均速度矢量在 x 、 y 、 z 轴上的分量, m/s; σ_l 和 σ_t 为层流与湍流的施密特数; S_τ 为源项; μ_l 和 μ_t 为层流粘度和湍流粘度, Pa·s。

对于上游建筑 B2, 其 W 列房间的空气龄从一楼至五楼呈现出显著的逐渐降低趋势。具体而言, 当街谷高宽比 (H/X) 为 1 时, 一楼空气龄为 41.6s, 而到了五楼则降至 16.12s, 降低幅度高达 61.2%; 当 H/X 为 1.5 时, 一楼空气龄为 42.1s, 五楼则降至 15.8s, 降低幅度为 62.5%。这一数据清晰表明, 随着楼层的升高, 空气流通性显著增强, 导致空气龄明显减小。在 L 列中, 空气龄也随楼层升高而降低, 但变化幅度相对较小。在 $H/X=1$ 的条件下, 一楼空气龄为 89.31s, 五楼降至 34.19s, 降低幅度为 61.7%; 在 $H/X=1.5$ 时, 一楼空气龄为 91.8s, 五楼则降至 33.8s, 降低幅度为 63.2%。值得注意的是, 当 H/X 从 1 增加到 1.5 时, B2 建筑各楼层房间的空气龄变化并不显著, 最大变化幅度不超过 5%, 这说明 H/X 对 B2 建筑房间空气龄的影响相对有限。

中间建筑 B5 的 W 列房间空气龄在一楼至四楼逐渐增大，其中四楼达到最大值，分别为 82.38s ($H/X=1$ 时) 和 212s ($H/X=1.5$ 时)，而五楼则略有下降。在 L 列中，空气龄随楼层升高而显著增加，特别是在 $H/X=1.5$ 的条件下，五楼空气龄达到最大值 356s，与一楼相比增长了 346%，显示出极为显著的增幅。然而，当 H/X 增加到 1.5 时，B5 建筑 W 列和 L 列各楼层的空气龄普遍下降，其中 W 列五楼空气龄下降了 56.9%，L 列五楼空气龄更是大幅下降了 61.7%，表明较大的街谷高宽比有助于改善 B5 建筑的通风性能。

下游建筑 B8 的 W 列和 L 列房间空气龄在各楼层间表现出相对稳定的特性。在 W 列中，空气龄的最大变化幅度不超过 25%；在 L 列中，空气龄的最大变化幅度也不超过 40%。然而，值得注意的是，在 $H/X=1.5$ 时，B8 建筑各楼层房间的空气龄普遍低于 $H/X=1$ 时的数值。具体而言，W 列一楼空气龄下降了 26.6%，L 列一楼空气龄下降了 33.3%。

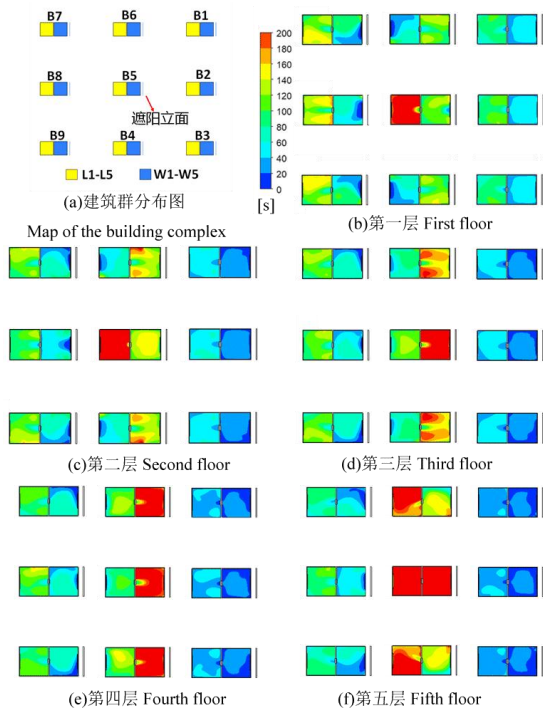


图 12 $H/X=1.5$ 和 $\theta=60^\circ$ 时，建筑群各楼层行人高度的室内空气年龄分布云图比较

Fig.12 Comparison of indoor air age distribution cloud maps at pedestrian heights on each floor of the building complex when $H/X=1.5$ and $\theta=60^\circ$

图 12 展示了当街谷高宽比 (H/X) 为 1.5 且遮

阳翻板旋转角为 60° 时，建筑群各楼层行人高度处的室内空气龄分布云图对比情况。

总体来看，上游建筑 (B1, B2, B3) 的室内空气龄分布呈现出一种较为均匀的状态，云图整体颜色偏浅，这直接反映了空气龄数值较小，进而表明空气品质相对优越。在这些建筑中，新鲜空气在建筑室内区域中占据主导地位，彰显出良好的空气流通性能。

相比之下，中间建筑 (B4, B5, B6) 的空气龄分布则呈现出一种显著的集中趋势。特别是中部区域，颜色较深，这预示着该区域的空气龄数值较大，空气品质因此相对较差。与上下游建筑相比，中间建筑的空气龄分布更为集中，其整体空气品质显然不及上游建筑。至于下游建筑 (B7, B8, B9)，其空气龄分布虽然再次趋于均匀，但整体颜色偏深，这表明空气龄数值较大，空气品质较差。在这些建筑中，较旧的空气占据较大比例，空气流通性相对较弱。

具体而言，在每一层的云图中，可以清晰地观察到空气龄数值较高的区域 (表现为图中灰度较深的部分) 与空气龄数值较低的区域 (表现为图中灰度较浅的部分) 形成了鲜明对比。然而，随着楼层的逐渐上升，这些高空气龄区域 (深灰色) 不断扩大，且主要集中在中间建筑的 L 列。这表明在这些特定区域，空气的更新速度明显较慢，空气品质因此相对较差。

在街谷高宽比 (H/X) 为 1 的情况下，中间建筑 B5 的通风效果最差，其通风量为 $5.57\text{m}^3/\text{s}$ ，明显低于上游建筑 (如 B1)。随着街谷高宽比增至 1.5，B5 的通风量下降最为显著，降幅达 55.8%，而上游建筑的通风量变化较小。这表明，街谷高宽比的增加加剧了中间建筑的通风问题，尤其是位于街谷中心的建筑，容易受到风流阻碍。根据这一结果，实际工程中应避免将重要通风功能区设置在街谷中部，并通过优化建筑间距和布局改善风流通道。同时，设计可调节的遮阳装置和外立面系统可进一步优化风环境，提升整体通风效果。

3 结论

本文以遮阳翻板为例，研究了带有可调节外立面构件的多层建筑群风环境。基于 CFD 数值模拟，建立了室内外气流耦合计算模型，并与前人实验数

据进行验证。在模拟研究中, 讨论了遮阳翻板旋转角和街谷高宽比对 3×3 建筑群的街道峡谷气流、室内外风速分布、建筑通风量与室内空气龄的影响。主要结论如下:

(1) 增大街谷高宽比会导致建筑群内的平均风速显著降低, 下降幅度在 5.91%至 11.83%之间, 表现为低风速区间占比增加、中等风速区间占比减少、高风速区间占比略有上升。表明街谷高宽比的增加阻碍了风流的顺畅通过。

(2) 在遮阳翻板旋转角 $\theta=60^\circ$ 且增大街谷高宽比的条件下, 上游建筑 B2 的房间通风量随楼层上升而显著增加, 增长幅度从 155%提升至 169%; 中间建筑 B5 的通风量则随楼层上升急剧下降, 下降幅度高达 49%, 在高楼层存在严重的通风问题; 下游建筑 B8 的通风量相对稳定, 但整体通风量较 $H/X=1$ 时有所下降, 最大下降幅度 22%。

(3) 在遮阳翻板旋转角 $\theta=60^\circ$ 的条件下, 增大街谷高宽比, 上游建筑 B2 的房间空气龄变化较小, 最大变化幅度不超过 5%。但中间建筑 B5 的高楼层房间空气龄显著下降, 特别是 L 列五楼空气龄大幅下降了 61.7%, 显示出较大的街谷高宽比能显著改善 B5 的通风性能; 同时, 下游建筑 B8 各楼层房间的空气龄也普遍降低, B8-W1 和 B8-L1 的室内空气龄分别下降了 26.6%和 33.3%, 增大街谷高宽比对提升建筑的室内空气质量具有积极作用。

不足与展望: 本文虽在遮阳翻板旋转角和街谷高宽比对建筑群风环境的影响上有新发现, 但仍存局限。仅研究了 3×3 建筑群, 大规模建筑群的风环境研究有待深入。后续将扩大建筑群规模, 研究不同布局和形态的影响, 进行实验验证, 并探索更多可调节外立面元素的影响, 为城市规划和建筑设计提供更全面的指导。

参考文献:

- [1] Costanzo V, Donn M. Thermal and visual comfort assessment of natural ventilated office buildings in Europe and North America[J]. *Energy and Buildings*, 2017,140:210-223.
- [2] Cheng Z, Li L, Bahnfleth W P. Natural ventilation potential for gymnasia—Case study of ventilation and comfort in a multisport facility in northeastern United States[J]. *Building and Environment*, 2016,108:85-98.
- [3] Van Hooff T, Blocken B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO₂ gas dispersion from a semi-enclosed stadium[J]. *Building and Environment*, 2013,61:1-17.
- [4] Chiesa G, Grosso M. Geo-climatic applicability of natural ventilative cooling in the Mediterranean area[J]. *Energy and Buildings*, 2015,107:376-391.
- [5] Belleri A, Avantaggiato M, Lollini R. Ventilative cooling in shop** centers' retrofit: the Mercado del Val case study[J]. *Energy Procedia*, 2017,111:669-677.
- [6] da Graca G C, Linden P. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings[J]. *Building and Environment*, 2016,107:263-273.
- [7] Karimimoshaver M, Sadathosseini M, Aram F, et al. The effect of geometry and location of balconies on single-sided natural ventilation in high-rise buildings[J]. *Energy Reports*, 2023,10:2174-2193.
- [8] KIRIMTAT Ayca, KREJCAR Ondrej. Energy-daylight optimization of louvers design in buildings[C]. In: *Computational Collective Intelligence: 10th International Conference, ICCCI 2018, Bristol, UK, September 5-7, 2018, Proceedings, Part II 10*. Springer International Publishing, 2018:447-456.
- [9] Hammad F, Abu-Hijleh B. The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building[J]. *Energy and Buildings*, 2010,42(10):1888-1895.
- [10] Jung S S. A Study on the Benefit-Cost Analysis of Solar Louver System[J]. *Journal of Power System Engineering*, 2019,23(4):72-77.
- [11] Wang Y, Chen Y, Li C. Airflow modeling based on zonal method for natural ventilated double skin facade with Venetian blinds[J]. *Energy and buildings*, 2019,191:211-223.
- [12] Zhang A, Gao C, Zhang L. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements[J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2005,93(12):891-904.
- [13] Chen G, Rong L, Zhang G. Impacts of urban geometry on outdoor ventilation within idealized building arrays under unsteady diurnal cycles in summer[J]. *Building and Environment*, 2021,206:108344.

- [14] Zhang M, Li J, Palusci O, et al. Reduced-scale numerical investigation of airflow around low-medium density neighbourhoods from the perspectives of drag force and ventilation efficiency[J]. *Urban Climate*, 2024,58: 102158.
- [15] Mei S J, Hu J T, Liu D, et al. Wind driven natural ventilation in the idealized building block arrays with multiple urban morphologies and unique package building density[J]. *Energy and Buildings*, 2017,155: 324-338.
- [16] Tominaga Y, Blocken B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions[J]. *Building and Environment*, 2015,92:452-461.
- [17] Hang J, Chen G. Experimental study of urban microclimate on scaled street canyons with various aspect ratios[J]. *Urban Climate*, 2022,46:101299.
- [18] Tao Y, Fang X, Setunge S, et al. Naturally ventilated double-skin façade with adjustable louvers[J]. *Solar Energy*, 2021,225:33-43.
- [19] Zheng J, Tao Q, Chen Y. Airborne infection risk of inter-unit dispersion through semi-shaded openings: A case study of a multi-storey building with external louvers[J]. *Building and Environment*, 2022,225: 109586.
- [20] Jiang F, Tao S, Tao Q, et al. The effect of louver blinds on the wind-driven cross ventilation of multi-storey buildings[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022,54:104614.
- [21] Bottillo S, Vollaro A D L, Galli G, et al. Fluid dynamic and heat transfer parameters in an urban canyon[J]. *Solar Energy*, 2014,99:1-10.
- [22] Battista G. Analysis of convective heat transfer at building facades in street canyons[J]. *Energy Procedia*, 2017,113:166-173.
- [23] Yang H, Chen G, Wang D, et al. Influences of street aspect ratios and realistic solar heating on convective heat transfer and ventilation in full-scale 2D street canyons[J]. *Building and Environment*, 2021,204: 108125.
- [24] Tao Q, Li Z, Zheng J, et al. A mathematical model for calculating total transmission of solar radiation through shuttle louvers and experimental verification[J]. *Energy and Buildings*, 2018,172:159-169.
- [25] Jiang Y, Alexander D, Jenkins H, et al. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003,91(3):331-353.
- [26] Bartak M, Cermak M, Clarke J A, et al. Experimental and numerical study of local mean age of air[C]. *Ibspa Building Simulation*, 2001.