

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.06.004

强风背景下环湖建筑街区的热湿模拟分析

杨明¹, 赵福云^{1, 2}, 高茵¹, 周宇轩¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 武汉大学 动力与机械工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为分析强风背景下水体对环湖建筑街区热湿环境的影响, 运用了CFD(计算流体力学)的方法对低层型、高层型、环湖上升型、环湖下降型等4种建筑街区形态进行了数值模拟。结果显示: 强风背景下, 水体对上游建筑街区的温湿度影响不明显, 对中下游建筑街区的温湿度影响较大, 且增湿降温效应主要集中于下游中央区域。建筑街区的高度变化和高度差对街区内的温湿度场均有较大的影响, 其中环湖内侧的低建筑物和内外高度差加速气流流动使得低层型、环湖上升型建筑街区的热湿环境较好, 环湖内侧高建筑物的阻挡使得高层型、环湖下降型建筑街区热湿环境较差。在4种形态下建筑街区下游(V_s 街谷)中央区域的热湿环境最好, 且低温气体在流经建筑街区之后还会向后延伸100~300 m的扩散距离。研究表明: 水体取代部分密集建筑, 通过合理布局可大范围优化建筑街区的热湿环境。

关键词: 环湖建筑街区; 热湿环境; CFD; 增湿降温效应

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)06-0021-08

引文格式: 杨明, 赵福云, 高茵, 等. 强风背景下环湖建筑街区的热湿模拟分析[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(6): 21-28.

Thermal and Humidity Simulation Analysis of Building Blocks Around the Lake Under Strong Wind Background

YANG Ming¹, ZHAO Fuyun^{1, 2}, GAO Han¹, ZHOU Yuxuan¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In view of an analysis of the impact of water bodies on the thermal and humid environment of building blocks around the lake under strong wind conditions, CFD (computational fluid dynamics) method has been adopted for a numerical simulation of four types of building block shapes: low rise, high rise, rising, and falling. The results show that under strong wind background, the water body exerts no effect on the temperature and humidity of upstream building blocks, but has a significant impact on the temperature and humidity of middle and downstream building blocks, with the humidification and cooling effects mainly concentrated in the central downstream area. The height change and height difference of the building block have a significant influence on the temperature and humidity field within the blocks, among which the low buildings on the inner side of the lake and the height difference between the inside and outside accelerate the airflow, which results in a better thermal and humidity environment for the low rise and rising building blocks around the lake. Meanwhile, the obstruction of high buildings on the inner side of the lake leads to a poorer thermal and humidity environment for the high rise and falling building blocks around the lake. The central area downstream of the building block (V_s street valley) has the best thermal and humid environment among the four

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 湖北省自然科学基金(气象)创新发展联合基金资助重点项目(2022CFD016)

作者简介: 杨明, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城市通风和计算流体力学, E-mail: 1565378551@qq.com

forms, with the low-temperature gas extending a diffusion distance of 100~300 m after flowing through the building blocks. The results show the substitution of some dense buildings with water bodies helps to optimize the thermal and humid environment of building blocks on a large scale based on a reasonable layout.

Keywords: surrounding lake architectural block; thermal and humidity environment; CFD; humidification and cooling effect

1 研究背景

随着城市化建设进程的加快,城市区域尺度热岛效应越来越强烈,即城市中心的气温高于外围郊区,这些高温中心不仅会影响人们的生活环境和生活质量,还会严重危害城市生态系统和公共安全。近年来,采取了各种措施缓解城市热岛效应,其中利用水体(河流、湖泊、池塘)降低周围城市环境温度是缓解城市热岛效应最有效的方式之一^[1],水体具有较高的热惯性、热容和热导率,较低的发射率,在调节城市小气候方面具有重要的潜在价值^[2]。在众多学者的研究中,量化城市水体的蒸发冷却作用是非常重要的,常用的研究方法有3种:实地测量、遥感探测和数值模拟。最近的研究中,中国科学院大学实地测量了奥林匹克公园中水体的降温效应^[3];北京师范大学利用遥感探测了水冷岛的年际变化^[4];东南大学建筑学院运用数值模拟计算了上海某公园水体的降温效应^[5];北京建筑大学运用数值模拟在微观尺度上分析不同水体对局部热环境的冷却作用。虽然现场测量准确,但测量成本高,依赖于气象和地理条件,遥感方法主要关注冷却效应的强度和范围与水体面积和空间格局的关系。与现场测量相比,数值模拟流场无干扰、成本低;与遥感相比,数值模拟具有分辨率和维度上的优势,可以获得米尺度的三维温度数据。

但水体如何影响周围建筑街区的热环境,多数研究仅针对水体产生的低温效应,忽略了水体蒸发后对气流的扰动作用以及增湿效应,而本研究旨在探究水体周围建筑街区的热湿耦合,分析其热湿环境。近年来,城市区域的风力明显减弱,而强风背景下建筑整体本身作为障碍物会对周围的来流风造成一定的阻挡,但同时又在街区内部为来流风提供相应的通风廊道(通风路径)^[6]。虽然城市街区由形状大小不一的建筑物和其他不同的下垫面组成,但对城市街区进行简化后采用全尺寸的理想化物理模型对其进行参数化的分析仍是十分有效的,已有多方面的研究成果表明此类研究的准确性^[5-8]。因此,本研究在强风背景下以城市人工水体为例,采用数值模拟的方法对三维

街区峡谷内的气流场和温湿度场进行了分析,评估水体对城市环境中蒸发冷却的作用,其中包括气流、温度和湿度之间复杂的相互作用,并探讨了4种不同建筑街区形态下(低层型、高层型、环湖上升型、环湖下降型)建筑街区的气流流动和温湿度分布情况。

2 数值计算模型

2.1 物理模型

模型中忽略了大气波动,通过对边界条件的设定,考虑了湍流、边界层扰动、地形扰动的影响。三维物理模型计算域示意图如图1所示,计算域左侧为入流边界,假设入口处气流流速均匀,采用速度入口边界(velocity inlet),与建筑街区距离为 $10H$ (H 为建筑高度);计算域右侧为出流边界,采用自由出流边界(outflow),与建筑街区距离为 $17H$;计算域顶部边界与地面距离为 $8H$,两侧与地面距离为 $5H$,计算域两侧和顶部采用对称边界(symmetry),流体在计算域的出口处可视为充分发展湍流,为了满足平行流的实现条件,所有建筑壁面和计算域地面均设定为无滑移的刚性壁面(wall)^[6]。整个计算域的尺寸为 $40H \times 23H$ 。

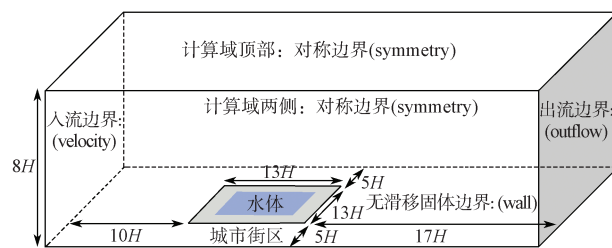


图1 三维物理模型计算域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D physical model calculation domain

图2所示为三维建筑街区的模型示意图及剖面。建筑街区由40个矩形建筑阵列及一块矩形人工水体组成,建筑阵列均匀地分散在水体四周。其中建筑高度为 $H=30$ m,建筑宽度为 $B=30$ m,街道峡谷的宽度为 $W=30$ m,水体位于建筑街区中心处以模拟水蒸

气的扩散,水体宽度为 150 m。环境中的背景风假设为垂直方向上的中性梯度风,并从左至右依次流经建筑街区,以模拟真实的大气环境^[6-7]。

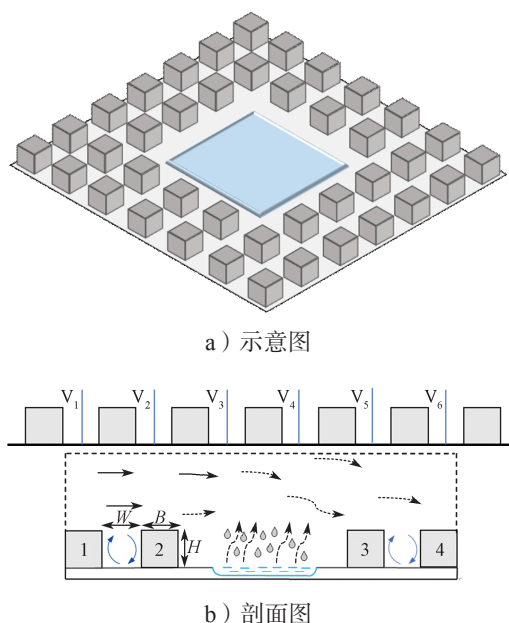


图2 建筑街区示意图及剖面图

Fig. 2 Schematic and sectional diagram of architectural blocks

如图 2b 所示,建筑街区形态的改变通常在平均高度一致的前提下,通过改变内外侧建筑的高度,从而形成建筑物环湖趋势的高度变化和差异^[7],并加入了高层建筑的考虑,共设置了 4 种模拟计算的工况,具体参数如表 1 所示。

表 1 物理模型的工况设置参数

Table 1 Setting parameters for physical model operating conditions

工况名称	H_1	H_2	H_3	H_4	高度差	平均高度	水宽
低层型	30	30	30	30	0	30	150
高层型	60	60	60	60	0	60	
环湖上升型	36	21	21	36	15	30	
环湖下降型	24	39	39	24	15	30	

2.2 数学模型

假定 4 种模拟工况下的流体均为不可压缩的等温流体,基于 FLUENT (2019) 软件,选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来进行模型验证并求解三维稳态下的温湿度场^[8-10],其控制方程和湍流动能及耗散率方程如下所示:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right), \quad (2)$$

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k. \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中: u_i 为平均速度张量; x_i 、 x_j 为笛卡尔坐标; ρ 为空气密度; P 为大气压力; δ_{ij} 为克罗内克尔符号; k 为湍流动能; ν 为运动黏度系数; ν_t 为湍流动力扩散系数。

$$\bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{1}{\rho} P - \varepsilon, \quad (4)$$

$$\bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{1}{\rho} C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G_k) C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

式 (4) ~ (5) 中: ε 为湍流耗散; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 取 1.44 和 1.92; σ_k 和 σ_ε 为湍流普朗特数; G_k 为时均速度梯度引起的湍流动能的产生项。

对于水体,需要计算其与大气之间充分的水蒸气扩散,通过组分运输模型计算水面的湍流质量扩散方程如下:

$$J_{H_2O} = - \left(\rho D_{H_2O,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_{H_2O} - D_{T,H_2O} \frac{\nabla T}{T}. \quad (6)$$

式中: Y_{H_2O} 为水蒸气的局部质量分数; $D_{H_2O,m}$ 为混合物中水蒸气的质量扩散系数; Sc_t 为湍流施密特数; T 为温度; D_{T,H_2O} 为热扩散系数; ρ 为水的密度。

2.3 计算域与边界条件

为提高数值计算的准确性^[11-15],根据几何模型特征采用结构性网格对整个计算域进行网格划分。由于在流体流动过程中,黏滞力会影响近壁面处的流体,因此在建筑近壁面和地面处网格进行局部加密处理。网格的高度可采用如下公式进行计算:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu}. \quad (7)$$

式中: ρ 为流体密度; u_τ 为流体摩擦速度; μ 为运动黏度; y 为最小网格高度,也就是与墙面的距离。

可以通过 y^+ 值去确定第一层网格的高度。对于高雷诺数模型 (如 RNG $k-\varepsilon$ 模型), y^+ 值接近 30 时最佳。此外,在网格划分时,加密处理近壁面处的网格,降低其余区域的网格密度。经计算,在建筑近壁面最小网格尺寸为 0.05,网格增长率为 1.2。

入流边界的选择需要基于风洞实验的设置或预先设定,本研究根据 M. J. Brown 等^[12] 的风洞实验来设定入流风廓线。其中建筑屋顶参考风速 $V_{ref}=3.0$ m/s,计算域入流边界的指数风廓线表达式如式 (8) 所示,湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的表达式分别如式 (9)、(10) 所示。入口来流处、水体表面处参数设置^[13] 如表 2 所示。

$$u(z) = 3.0 \times \left(\frac{z}{30} \right)^{0.16}, \quad (8)$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (9)$$

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{3/4} k^{3/2} (K_V z). \quad (10)$$

式(8)~(10)中: u_* 为大气与地面的剪切速度, 0.24 m/s; C_μ 为 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型常数, 取 0.09; z 为计算域的高度; K_V 为冯卡门常数, 取 0.4。

表 2 参数设置

Table 2 Parameter settings

位置	温度 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度 /%	水蒸气质量分数
入口来流处	36.1	45.00	0.017 4
水体表面处	27.0	100.00 (饱和)	0.022 5

水蒸发对街区的风速、温度和水蒸气分布有着重要影响^[16]。道尔顿提出了一个蒸发方程, 其中风速和水蒸气压差是两个主要影响因素, 道尔顿方程已被广泛接受和使用^[14]。在本研究中, 将水的蒸发速率定义为道尔顿蒸发方程的变换式, 饱和水汽压可由修正 Tetens 方程计算, 以及水汽压计算式如下:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = (4.222\,2 + 0.836V) \times 10^{-10} (e_s - e_a) \rho / H_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (11)$$

$$e_s = 6.112 \times e^{\left(\frac{17.67T}{T+243.5} \right)}, \quad (12)$$

$$e_a = f \cdot e_s. \quad (13)$$

式(11)~(13)中: $m_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的水蒸气释放率, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; V 为水面风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $H_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水面高度, 为街区模型的最小网格, 0.1 m; e_s 为水面温度下的饱和蒸汽压; e_a 为空气温度下的蒸汽压, hPa; ρ 为水的密度, $1\,000 \text{ kg/m}^3$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; f 为相对湿度, %。

水蒸发所吸收的热量与蒸发热有关。假设水的蒸发热在 273.15~323.15 K 范围内呈线性变化^[14], 则水的能量吸收效率如下:

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = -m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot LAT. \quad (14)$$

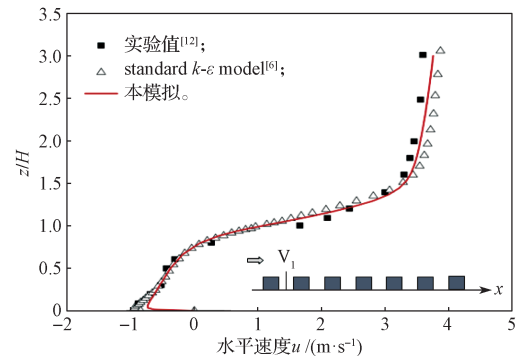
式中: $E_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的吸收效率, W/m^3 ; LAT 为汽化热 (298.15 K 时为 $2.441\,75 \times 10^6 \text{ J/kg}$)。

3 结果与讨论

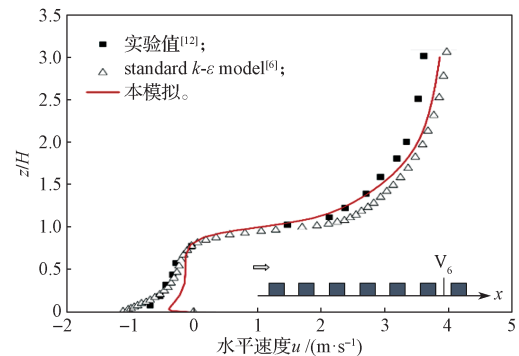
3.1 模型验证

模型中对于水体低温表面的计算应更为精确准确且水体上空有多个湍流漩涡区, 而 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型比起 standard $k-\varepsilon$ 湍流模型更满足上述要求, 其考虑了低雷诺数时流动黏性的解析公式。为了验证 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型数值模拟结果的准确性和可靠性,

将其数值模拟结果与 M. J. Brown 等^[12] 的风洞试验结果和 Hang J. 等^[6] 的 standard $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟结果进行了数据比较, 结果如图 3 所示。



a) V_1 水平速度比较



b) V_6 水平速度比较

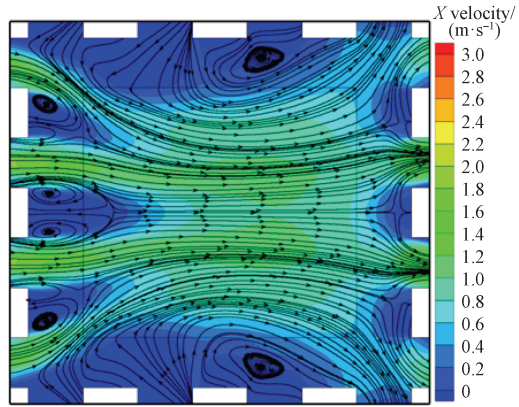
图 3 数值模拟结果与风洞试验结果比较

Fig. 3 Comparison between numerical simulation results and wind tunnel test results

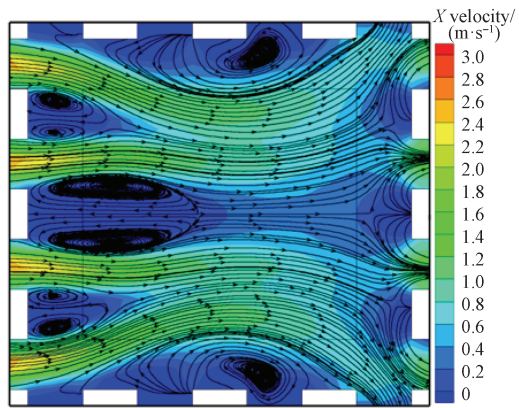
选取计算域中街谷 V_1 中心处垂直剖面上的水平速度 u 和街谷 V_6 的垂直速度 u 作为比较对象。从图 3 中可以看出, 在街区高度范围内, 模拟值与实验值的总体平均相对误差低于 15%, 说明本研究的数值方法具有一定的准确性和可靠性。

3.2 风速分布

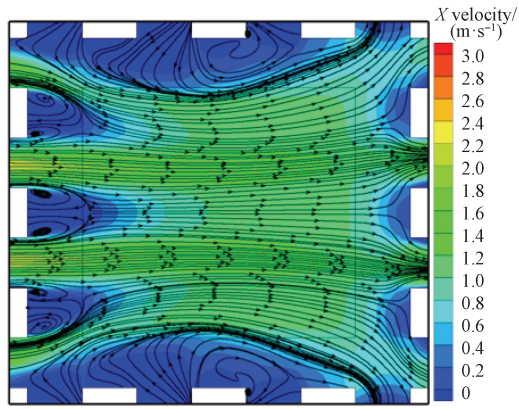
下面是 4 种不同建筑形态下的风速流线图, 街区内部的气流特性直接决定了建筑周围的热湿环境, 因此, 选取水面上空行人高度处 (1.5 m) 的流线图对比分析。从图中看出, 对于低层型和环湖上升型建筑街区, 较低的建筑物高度没有给气流造成过多的阻挡, 当气流经过水面上方时, 上空的气流有足够的时间沉降与近地面气流汇合, 流速更快, 方向的转变较小, 气流更快地向下游建筑街区扩散。对于高层型和环湖下降型建筑街区, 气流进入街区后, 在上游背风面和两岸形成多个涡流, 较高的建筑物高度使得气流没有足够的时间向下沉降, 直接撞击在下游壁面上, 在气流流向发生约 180° 转向与近地面气流撞击在一起, 随后汇合的气流停滞在 V_5 街谷, 其中环湖下降型建筑中央区域的风速远远小于其他三者。



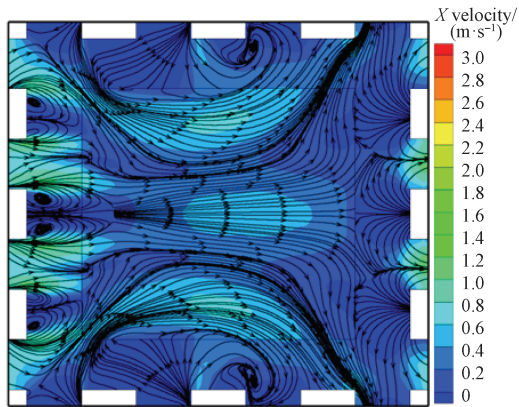
a) 低层型



b) 高层型



c) 环湖上升型



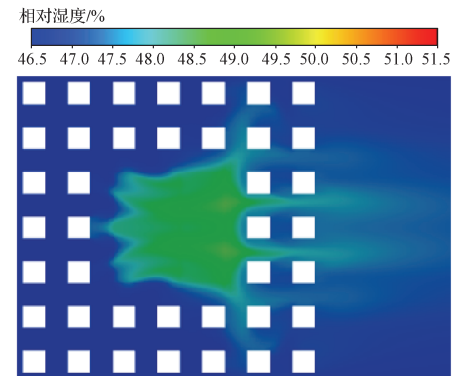
d) 环湖下降型

图4 4种不同建筑形态下的风速流线图

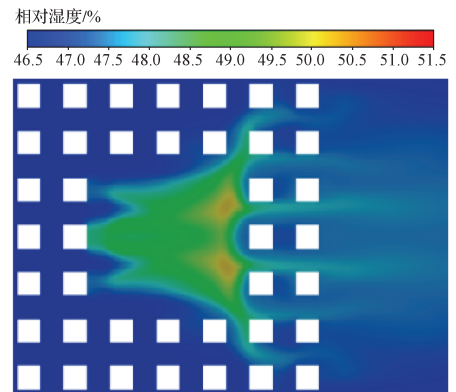
Fig. 4 Wind speed streamline map under four different architectural forms

3.3 温湿度分布

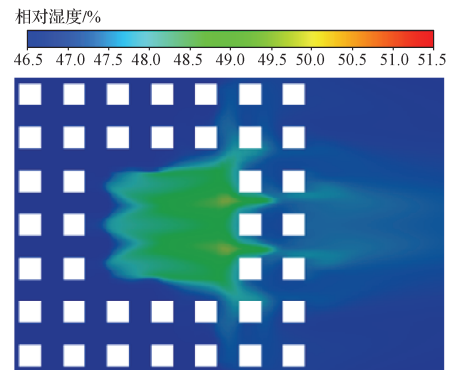
图5~6为4种类型建筑街区行人高度处(1.5 m)的湿度场和温度场云图。



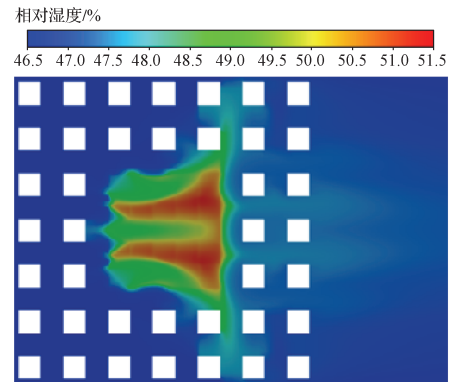
a) 低层型



b) 高层型



c) 环湖上升型



d) 环湖下降型

图5 4种不同建筑形态下的相对湿度场云图

Fig. 5 Cloud map of relative humidity field under four different architectural forms

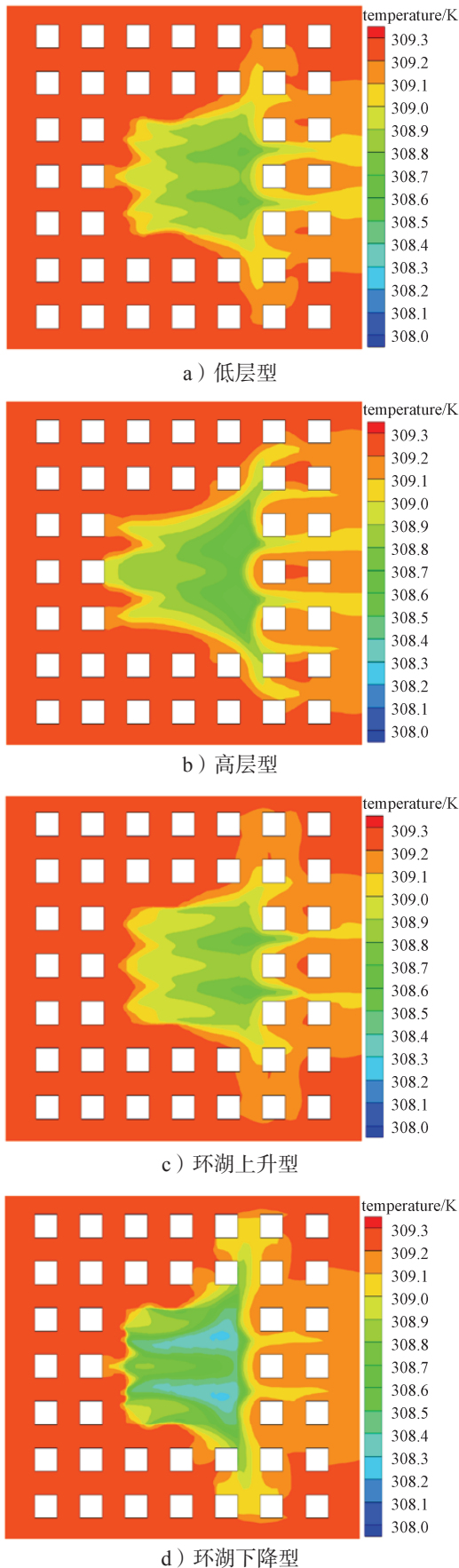


图 6 4 种不同建筑形态下的温度场云图
Fig. 6 Temperature field cloud map under four different architectural forms

对于湿度变化, 4 种不同形态的建筑街区中, 增湿效应存在一定差异。在环湖下降型(内高外低)形态中, 由于内侧有高层建筑物的阻挡, 导致气流堵塞在峡谷中, 高湿度的气流不能较为通畅地向下游扩散, 使得增湿效应分层最为明显。高层型与环湖下降型类似, 受到内外两侧高层建筑物的阻挡, 使得高湿度的气流大多数向垂直气流方向的峡谷扩散, 而在水平气流方向的峡谷中, 扩散得不够充分。在环湖上升型街区形态中, 受到高度差的影响, 高湿度的气流在下游靠左右岸的峡谷内不能充分扩散, 致使高湿度气流集中扩散至下游中央处, 即增湿效应集中作用于此区域。低层型与环湖上升型类似, 在下游靠左右岸的峡谷内同样不能充分扩散, 但外侧的建筑物相对更低, 所以在下游中央处的扩散较其更为明显。

温度的降低主要是由于蒸发冷却作用所带来的, 该过程中水体会吸收大量热量。对于温度变化, 4 种不同形态的建筑街区中, 降温效应也存在类似差异。在高层型、环湖下降型(内高外低)形态中, 由于内侧有高层建筑物的阻挡, 低温气流更多地堆积在下游第一排建筑迎面风(V_5 街谷), 也就使得其降温效应要更强, 但对下游中央区域的影响程度较小。而低层型、环湖上升型街区内受到低层建筑和建筑高度差的影响, 建筑中央区的低温气流分布较为均匀且发散, 但其对于下游中央区域的建筑降温效应比前两者更高, 尤其是低层型街区。

值得一提的是, 在所有街区形态中, 增湿效应和降温效应皆主要作用在下游第一排建筑的迎面风(V_5 街谷), 且从图 5 可以看出, 在水体对建筑街区的增湿降温效应后, 增湿降温区域都可以向建筑街区后方延伸 100~300 m 的距离, 影响范围因建筑街区的变化而变化。这表明水体对建筑街区的增湿降温效应不仅影响着水体周围的建筑, 而且对建筑街区下游的其他下垫面(建筑、绿地、公路)的热湿环境都有着很大的影响。

3.4 温湿度数值分析

整个计算域是以 Y 方向中心轴立面为对称的计算域, 两侧的计算结果完全相同, 所以研究此建筑街区时, 可以只研究计算域一半的区域, 本研究选取上半区域。图 7 是 4 种不同建筑形态的下游($V_5 \sim V_6$ 峡谷) 6 个测量点位的温湿度数据图。图中数值表明水体对下游建筑街区可以增加行人层 1.9%~2.6% 的湿度, 可以降低 0.5~1.3 K 的温度。图中可以看出, 低层型建筑的温湿度波动相对较大, 尤其是“4”测量点位, 增湿降温效果明显高于其余 3 个建筑形态, 原因是低层建筑对高湿低温气流的阻挡效果较小; 而

高层型和环湖上升型以及环湖下降型的 V_6 街谷的温湿度走势较为相似,这是由于高建筑物阻挡的结果,其中 V_5 街谷测量点位的偏差是由于内侧建筑物高度的不同所引起的,即 V_5 街谷的增湿降温效应主要取决于朝向水体的第一列建筑物的高度。但中心测量点位只能反映出每个街谷的热湿情况趋势,并不能反映出水体对环境最大程度的降温效应。

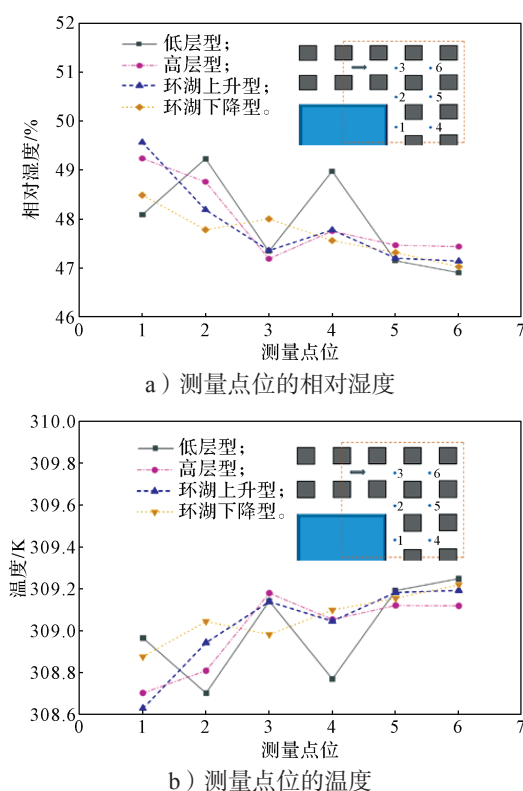


图7 测量点位的相对湿度和温度图

Fig. 7 Relative humidity and temperature map at measuring points

4 结论

1) 水体的蒸发冷却作用主要影响下游建筑街区,在气流受到建筑物的阻挡作用后向左右两岸靠下游的建筑街区扩散,整个增湿降温区域可向建筑街区后方延伸 100~300 m,但受到影响最大的始终是 V_5 街谷的热湿环境。

2) 水体的蒸发冷却作用可以提高环境的热舒适性,环湖内外侧建筑物的高度越低,效果越明显,且建筑街区平均高度一致的情况下,环湖上升型建筑比环湖下降型建筑的整体热湿环境更好。

上述研究表明,水体的冷却作用表现为通过自身蒸发吸收热量,从而降低街区内的温度,但增高的湿度会抑制人体皮肤表面的“不感蒸发”^[17-18]。本文主要是通过探究强风背景下水体蒸发冷却作用的影响

机理,为城市建筑规划者们提供一个设计的思路。

参考文献:

- [1] SHI D, SONG J, HUANG J, et al. Synergistic Cooling Effects (SCEs) of Urban Green-Blue Spaces on Local Thermal Environment: A Case Study in Chongqing, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102065.
- [2] CAO B L, CHEN Q, DU M Y, et al. Simulation Analysis of the Cooling Effect of Urban Water Bodies on the Local Thermal Environment[J]. Water, 2022, 14(19): 3091.
- [3] AMANI-BENI M, ZHANG B, XIE G D, et al. Impact of Urban Park's Tree, Grass and Waterbody on Microclimate in Hot Summer Days: A Case Study of Olympic Park in Beijing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 32: 1-6.
- [4] YU K, CHEN Y H, LIANG L, et al. Quantitative Analysis of the Interannual Variation in the Seasonal Water Cooling Island (WCI) Effect for Urban Areas[J]. Science of the Total Environment, 2020, 727: 138750.
- [5] YANG J Y, HU X Y, FENG H Y, et al. Verifying an ENVI-Met Simulation of the Thermal Environment of Yanzhong Square Park in Shanghai[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 66: 127384.
- [6] HANG J, WANG Q, CHEN X Y, et al. City Breathability in Medium Density Urban-Like Geometries Evaluated Through the Pollutant Transport Rate and the Net Escape Velocity[J]. Building and Environment, 2015, 94: 166-182.
- [7] HUANG Z R, ZHANG Y J, WEN Y B, et al. Synoptic Wind Driven Ventilation and Far Field Radionuclides Dispersion Across Urban Block Regions: Effects of Street Aspect Ratios and Building Array Skylines[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 78: 103606.
- [8] MEI S J, LUO Z W, ZHAO F Y, et al. Street Canyon Ventilation and Airborne Pollutant Dispersion: 2-D Versus 3-D CFD Simulations[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101700.
- [9] HANG J, SANDBERG M, LI Y G, et al. Pollutant Dispersion in Idealized City Models with Different Urban Morphologies[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(38): 6011-6025.
- [10] 梅硕俊. 风压和热压作用下高密度城市通风和扩散模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
MEI Shuojun. Numerical Simulation of the Ventilation and Pollutant Dispersion at High-Density Urban Area Driven by Wind and Buoyancy[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [11] SHA C Y, WANG X M, LIN Y Y, et al. The Impact

- of Urban Open Space and ‘Lift-Up’ Building Design on Building Intake Fraction and Daily Pollutant Exposure in Idealized Urban Models[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1314–1328.
- [12] BROWN M J, LAWSON R E. Comparison of Centerline Velocity Measurements Obtained Around 2D and 3D Building Arrays in a Wind Tunnel[J]. *International Symposium on Environmental Hydraulics*, 2001, 5: 495.
- [13] 张伟, 陈存友, 胡希军, 等. 基于计算流体力学 (CFD) 的湖泊因子对城市湖泊增湿效应的模拟研究: 以湖南烈士公园湖泊为例 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(1): 110–119.
- ZHANG Wei, CHEN Cunyou, HU Xijun, et al. Simulation Study on the Effect of Lake Factors on the Humidification of Urban Lakes Based on CFD: Take the Lake of Lieshi Park in Hunan as an Example[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(1): 110–119.
- [14] LIU J R, ZHAO Y J, LAM C K C, et al. Integrated Impacts of Solar Heating and Water Evaporation on Urban Airflows and Thermal Environments in 2D Street Canyons[J]. *Urban Climate*, 2023, 48: 101411.
- [15] 赵福云, 徐颖, 成瑾, 等. 密集城市建筑街区突发气态污染物扩散模拟 [J]. *湖南工业大学学报*, 2019, 33(5): 14–18.
- ZHAO Fuyun, XU Ying, CHENG Jin, et al. Simulation of the Accidental Gaseous Pollutant Dispersion in Dense Urban Building Blocks[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2019, 33(5): 14–18.
- [16] TOMINAGA Y, SATO Y, SADOHARA S. CFD Simulations of the Effect of Evaporative Cooling from Water Bodies in a Micro-Scale Urban Environment: Validation and Application Studies[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2015, 19: 259–270.
- [17] LIU Y, LI X F, YANG H L, et al. Skin-Interfaced Superhydrophobic Insensible Sweat Sensors for Evaluating Body Thermoregulation and Skin Barrier Functions[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(6): 5588–5599.
- [18] JACOBS C, KLOK L, BRUSE M, et al. Are Urban Water Bodies Really Cooling?[J]. *Urban Climate*, 2020, 32: 100607.
- (责任编辑: 申 剑)

.....

(上接第 8 页)

- The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(5): 1021–1026.
- [12] 李建林. 岩石力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2014: 318–320.
- LI Jianlin. *Rock Mechanics*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014: 318–320.
- [13] 周光泉, 陈德华, 席道瑛. 岩石连续损伤本构方程 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1995, 14(3): 229–235.
- ZHOU Guangquan, CHEN Dehua, XI Daoying. Constitutive Equation of Rock Continuous Damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(3): 229–235.
- [15] 范文, 俞茂宏, 陈立伟. 考虑材料剪胀及软化的有压隧洞弹塑性分析的解析解 [J]. *工程力学*, 2004, 21(5): 16–24.
- FAN Wen, YU Maohong, CHEN Liwei. An Analytic Solution of Elasto-Plastic Pressure Tunnel Considering Material Softening and Dilatancy[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(5): 16–24.
- [16] 张玉军, 张维庆. 热-水-力共同作用下圆形洞室弹塑性解析解 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊 2): 41–44.
- ZHANG Yujun, ZHANG Weiqing. Elastic-Plastic Analytical Solution of Circular Cavern Under the Combined Action of Heat, Water and Force[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S2): 41–44.
- [17] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 283–284.
- CAI Meifeng. *Rock Mechanics and Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 283–284.
- (责任编辑: 申 剑)