



# 屋顶形状对街道峡谷微环境影响的数值 模拟研究

唐洁<sup>1</sup> 张双喜<sup>1,2</sup> 邵振峰<sup>3</sup> 邹晨阳<sup>1</sup> 易旭憧<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**随着城市化的快速发展,城市下垫面引起城市微环境的变化越来越明显。建筑屋顶结构对城市微环境单一物理场(风场或温度场)的影响受到人们的广泛重视,而两种物理场的同步影响却被忽视。建立了一个数值模型用来研究建筑屋顶形状对街道峡谷微环境的影响,该模型主要包含两个子模型——计算流体力学模型和辐射模型。针对常见的4种屋顶形状和3种太阳入射角建立二维数值模型,通过风洞实验检验后,分析街道峡谷内的微环境。结果表明,模型能够较好地模拟城市微环境;平房屋顶建筑物更有利于减轻城市热岛效应,三角形屋顶构成的峡谷热岛效应最强,下斜屋顶建筑不利于迎风面热量的扩散。

**关键词:**城市微环境;街道峡谷;数值模拟;建筑屋顶形状

中图分类号:P463.2

文献标志码:A

随着城市化的发展,城市下垫面的改造引起城市微气候的改变<sup>[1]</sup>。城市微气候参数包括温度、风速、相对湿度等,这些参数主要受建筑结构、材料、排列方式的影响<sup>[2-3]</sup>。在夏季,城市地区人为热的大量排放以及高密度、高热容的建筑材料和低反照率的建筑表面等高蓄热体及绿地减少等因素导致城市地区温度比周围乡村地区温度高,这种现象称为城市热岛效应。在全球范围内,这种热岛强度(城乡空气温度差)变化范围从0.6~12℃不等,强度随季节变化<sup>[4-5]</sup>。城市热岛不仅影响人的舒适性和健康,也会加大城市的能源消耗,目前减少城市多余热量的主要方法有增加绿化、更改城市下垫面结构等<sup>[6-7]</sup>。

街道峡谷作为城市的基础单元,是理解城市微气候的重要平台,数值模拟则是预测城市微气候环境的重要工具<sup>[8]</sup>。Xie等<sup>[9]</sup>使用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)构建了二维街道峡谷模型,模拟了不同高宽比和建筑面以及地表面加热对峡谷内流场和污染物扩散的影响,指出不同高宽比是影响峡谷内流场结构的主要因素;Kwak等<sup>[10]</sup>将城市地表辐射纳入CFD模

型,研究高宽比为1的街道峡谷内流场的日变化,结果表明,在弱风条件下,表面热通量与环境风速的依赖关系对峡谷内风速和环境风速的关系起着至关重要的作用。总而言之,城市微气候的研究更加注重环境要素的小幅度变化,更贴近居民的生活感受。

然而,上述研究的几何建筑物通常被简化成平顶建筑物。事实上,城市建筑物的屋顶形状是多种多样的,其对城市微环境也有着重要的影响<sup>[11]</sup>。过去,研究者主要关注屋顶形状对街区污染扩散以及风力选址的影响<sup>[12]</sup>,并未考虑屋顶形状是否会对峡谷内温度产生影响。Mahdavinejad等<sup>[13]</sup>使用CFD研究了4种屋顶形状的空气流和室内温度分布,结果表明,圆形屋顶相比于其他形状的建筑屋顶,可以使室内温度降低约8℃,由此可见屋顶形状对减少热传递和平衡屋顶温度有着重要影响,但是这项研究并没有考虑峡谷内的温度分布。显然,研究不同屋顶形状对城市街区的流场和热效应的同步影响能得到更加可靠的结论,有助于城市规划者选择更加合适的建筑屋顶形状,从而降低城市热效应。

收稿日期:2019-04-24

项目资助:国家自然科学基金(41874169,U1939204);武汉市多要素城市地质调查示范项目。

第一作者:唐洁,硕士生,主要从事城市地球物理数值模拟研究。jietang@whu.edu.cn

通讯作者:张双喜,博士,教授。shxzhang@sgg.whu.edu.cn

本文建立了一个数值模型用来研究建筑屋顶形状对街道峡谷微环境的影响, 针对常见的4种屋顶形状的建筑物结构以及3种太阳入射角, 模拟了街道峡谷内的微气候分布, 随后通过风洞实验证, 研究了12个模型的峡谷内流场与温度场分布。

## 1 数值模型构建

### 1.1 物理模型

本文主要考虑建筑屋顶形状对峡谷微环境的影响。针对常见的4种建筑屋顶形状(图1), 即平房屋顶、三角形屋顶、上斜屋顶、下斜屋顶, 构建了二维模型。假设不同屋顶形状的建筑物高度(建筑最高点到地面距离)相同, 平房建筑物的尺寸为25 m×25 m(长L×宽W), 上斜屋顶、下斜屋顶、三角形屋顶的建筑物高度为25 m, 屋檐距离地面高度为22 m。

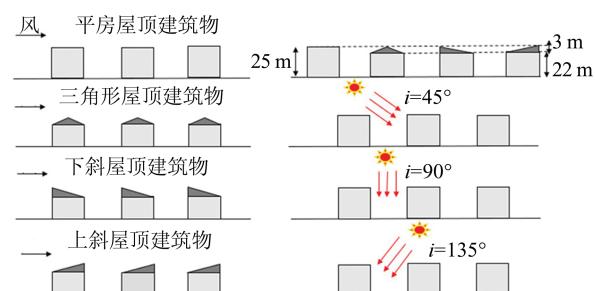


图1 街道峡谷建筑屋顶形状及太阳入射角示意图  
Fig.1 Sketch Map of Building Roof Shapes in Street Canyons and Solar Incident Angles

进一步考虑太阳的影响, 考虑3种太阳入射角即*i*=45°、90°、135°的情况。当*i*=45°和*i*=135°时, 太阳辐射强度为400 W/m<sup>2</sup>; 当*i*=90°时, 太阳辐射强度为800 W/m<sup>2</sup>。

### 1.2 主控方程

本模型由2个子模型构成, 即解决空气与建筑表面和地面热对流传输的CFD模型和解决建筑表面和地面与天空之间短波和长波辐射交换的辐射(radiation, RAD)模型。CFD模型采用雷诺平均法求解纳维-斯托克斯方程, 考虑热效应的影响, 用布辛涅斯克(Boussinesq)近似假设流体密度只随温度变化, 对于不可压缩流体, 主控方程包括以下3个方程:

1)连续(质量)方程, 表达式为:

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

2)动量守恒方程, 表达式为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) + f_i \quad (2)$$

3)能量守恒方程, 表达式为:

$$\bar{u}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (K_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}) = 0 \quad (3)$$

式中, *x<sub>i</sub>*是空间坐标;  $\bar{u}_i$ 是流体的平均流速;  $\bar{u}_i \bar{u}_j$ 是雷诺应力;  $\bar{P}$ 是压力;  $\rho$ 是空气密度;  $\nu$ 是动力黏度;  $f_i$ 为热效应引起的浮力;  $\bar{T}$ 为位温;  $K_T$ 是传热系数。为了求解方程(1)~(3), 联合标准  $k-\epsilon$  ( $k$ -epsilon) 模型求解, 标准  $k-\epsilon$  模型建立在半经验公式基础上, 是由 Launder 等<sup>[14]</sup>提出的, 因使用范围广、精度合理而被广泛使用。该模型用湍流动能  $k$  反映脉动特征速度, 湍流耗散率  $\epsilon$  反映特征长度尺度, 基于 Boussinesq 假设, 标准  $k-\epsilon$  方程为:

$$\frac{\partial (\bar{u}_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\bar{u}_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中,

$$\nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$P_k = \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 $C_\mu$  为经验常数,  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  分别为与湍流动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  所对应的 Prandtl 数,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。这5个经验值是从实验中获取的<sup>[14]</sup>。

RAD 模型用于计算辐射热流, 将计算得到的辐射热流传输到 CFD 模型, CFD 模型计算温度和风速平衡, 并将新的温度传输到 RAD 模型, 之后进行新的 RAD 模拟, 直到收敛。

### 1.3 计算模型和边界条件

图2所示为模型计算域和边界条件设置。计算模型尺度为20H×6.1H, H为建筑高度, 计算域顶部距离地表面为6H, 地层深0.1H, 入口边界与城市建筑群之间距离为5H, 出口边界与城市建筑群之间距离为10H。风速、湍流动能以及湍流耗散率的入口初始条件采用对数风剖面<sup>[15]</sup>, 分别如下:

$$u(y) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{y + y_0}{y_0} \right) \quad (8)$$

$$k(y) = \frac{u^*}{\sqrt{C_\mu}} \quad (9)$$

$$\epsilon(y) = \frac{u^*}{\kappa(y + y_0)} \quad (10)$$

式中,  $u^*$  为摩擦速度;  $y$  为距离地面的高度;  $y_0$  为动力学粗糙度, 取 0.05;  $\kappa$  为卡曼常数, 取 0.4。选取参考高度 10 m 时的平均风速 2.2 m/s, 风垂直流入城市街区峡谷。

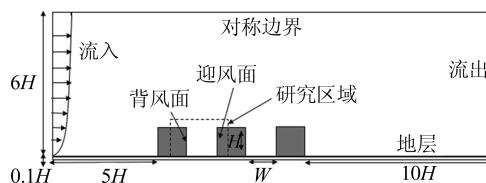


图 2 模型计算域和边界条件设置

Fig.2 Model Calculation Domain and Boundary Condition Setting

考虑出口边界条件, 出口边界上各变量的水平方向梯度为零; 上边界设定为对称边界条件; 建筑表面以及地面均采用无滑移壁面函数处理, 沿壁面切向流体速度为零; 空气温度以及建筑内部温度的初始值为  $T_0=27^\circ\text{C}$ 。为了模拟地面效应, 设置 2.5 m (0.1H) 的地层, 其中包括 0.7 m 的沥青地面以及 1.8 m 的土壤地层, 并且地底温度恒为  $20^\circ\text{C}$ <sup>[16-17]</sup>。

## 2 模型验证

在模型验证实验中, 采用平房屋顶建筑结构, 模型的尺度和建筑模型数量与文献[18]的风洞实验一致, 入口风速设置为 1.5 m/s, 空气初始温度设置为  $20^\circ\text{C}$ , 地表面温度设置为  $79^\circ\text{C}$ 。将验证实验  $x=13\text{ m}$  处的归一化温度(空气温度  $T$  与地面温度  $T_f$  之差/初始空气温度  $T_0$  与地面温度  $T_f$  之差)和归一化水平风速(水平风速  $U$ /初始风速  $U_0$ )与文献[18]的风洞实验和文献[19]的模拟结果进行对比(图 3)。由图 3 可见, 数值模拟计算得到的归一化风速和归一化温度与风洞实验在峡谷内( $y/H < 1$ )有较好的一致性, 但在屋顶高度上( $y/H > 1$ )存在较明显的差异, 这是由于本文主要考虑峡谷内部流体和温度分布, 而屋顶高度上的差异不进行讨论。在峡谷内部, 模拟结果与风洞数据的差异可归因为模拟条件和实验设置的差异, 风洞实验存在一些模拟实验没有的粗糙元素; 另外, 风洞实验的城市布局为三维模型, 而本文研究是二维模型, 尽管如此, 其总体趋势保持一致。

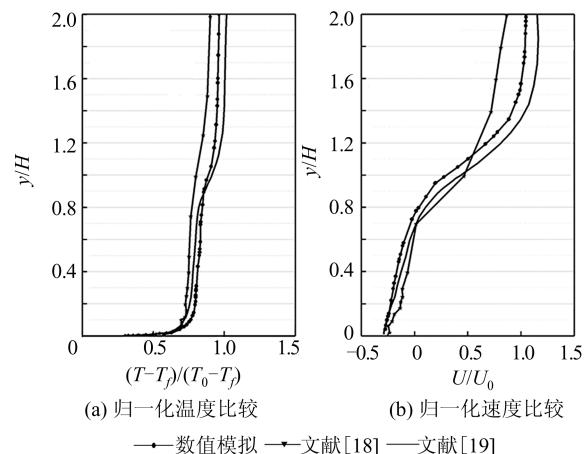


图 3 归一化温度和归一化速度对比

Fig.3 Comparison of Normalized Temperatures and Normalized Velocities

## 3 结果分析

### 3.1 流体分布特征

图 4~6 描述了 12 种不同情况下街道峡谷内流场分布。对于平房屋顶以及下斜屋顶, 流体经过首个建筑物时, 会在此建筑物上方形成一个小的顺时针涡旋; 对于三角形屋顶以及上斜屋顶, 流体经过首个建筑物时, 会平行于屋顶表面向上流动, 没有产生涡旋。

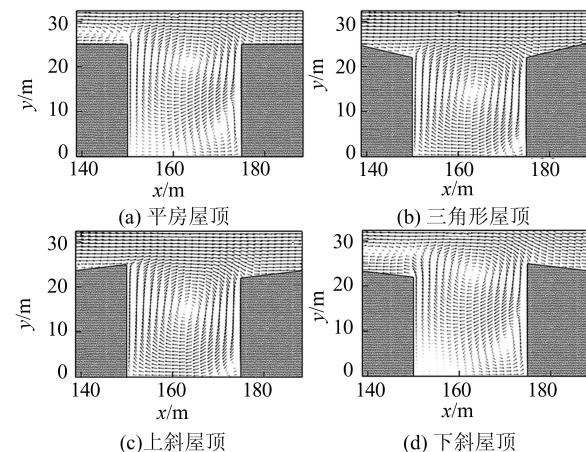


图 4  $i=45^\circ$  街道峡谷内流场分布

Fig.4 Streamline Fields of Street Canyon at  $i=45^\circ$

由图 4(a)、4(d) 可见, 当  $i=45^\circ$  时, 下斜屋顶峡谷内风速小于平房屋顶, 平房屋顶和下斜屋顶的峡谷内存在两个不同方向的涡旋, 上部的顺时针涡旋占据了  $3/4$  的峡谷, 下部为一个逆时针小涡旋, 这是由于此处向上的热效应克制了峡谷涡旋产生的向下的机械力。在三角形屋顶和上斜屋顶(图 4(b)、4(c)), 峡谷也产生了两个不同方向的涡旋, 一个位于峡谷中心, 占据了大部分峡

谷的顺时针涡旋, 另一个较小的涡旋在迎风面角落。

图 5 为  $i=90^\circ$  时的街道峡谷内流场分布, 可以发现, 不同形状的屋顶建筑构成的街道峡谷只存在一个大的顺时针涡旋, 涡旋中心位于峡谷中心上部, 覆盖整个峡谷。三角形屋顶和上斜屋顶建筑构成的峡谷内部风速大于平房屋顶和下斜屋顶。

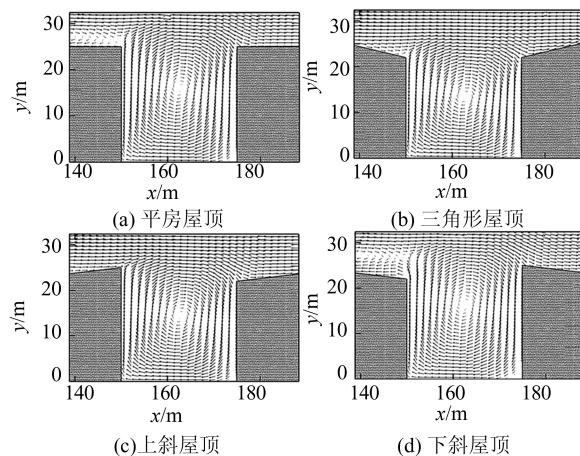


图 5  $i=90^\circ$  街道峡谷内流场分布

Fig.5 Streamline Fields of Street Canyon at  $i=90^\circ$

图 6 为  $i=135^\circ$  时的街道峡谷内流场分布, 可以看出, 流场结构与  $i=90^\circ$  时相似, 峡谷内只存在一个顺时针涡旋, 但对于平房屋顶和下斜屋顶构成的峡谷, 峡谷内部涡旋的中心有明显上升。

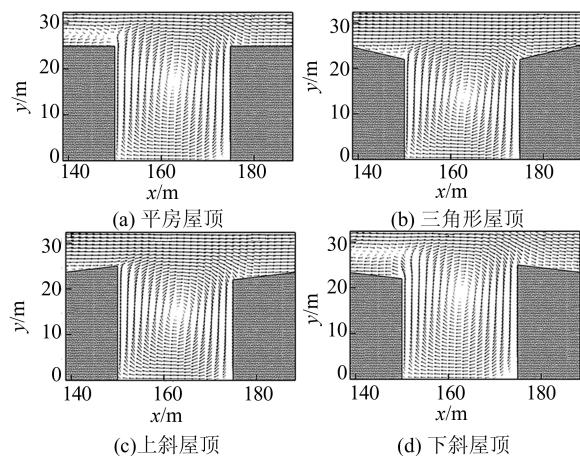


图 6  $i=135^\circ$  街道峡谷内流场分布

Fig.6 Streamline Fields of Street Canyon at  $i=135^\circ$

考虑不同的太阳辐射强度及入射角, 平房屋顶和下斜屋顶构成的峡谷内部流场分布相似, 三角形屋顶和上斜屋顶构成的峡谷内部流场分布近似, 推测这是由于建筑屋顶形状引起的。相较于三角形屋顶和上斜屋顶, 气流刚接触平房屋顶和下斜屋顶时发生碰撞分离, 并在首个屋顶上部

产生新的小涡旋, 从而引起峡谷内部气流的抬升, 同时在热效应影响下, 平房屋顶和下斜屋顶与三角形屋顶和上斜屋顶构成的峡谷在  $i=45^\circ$  时出现了明显不同的流场结构。

### 3.2 温度分布特征

不同的太阳入射角会导致壁面温度存在差异, 从而影响峡谷内部流场的结构, 同时不同的流场结构又会反过来影响峡谷内部的温度分布。图 7~9 描述了 4 种不同屋顶形状和 3 种不同太阳辐射入射角时街道峡谷内部的温度分布。为了方便描述, 下文温度都表示温度差异, 即温度  $T$  - 初始温度  $T_0$ 。

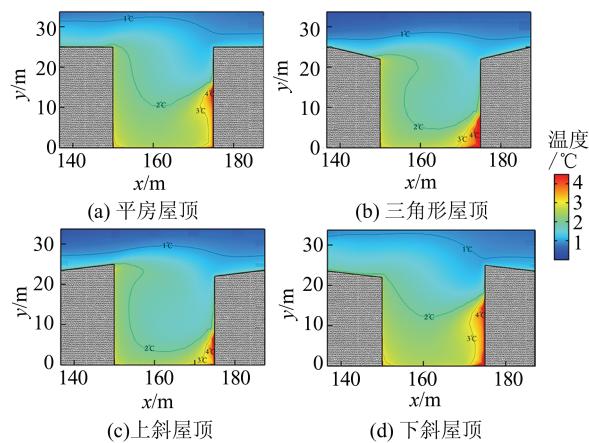


图 7  $i=45^\circ$  街道峡谷内温度分布

Fig.7 Temperature Fields of Street Canyon at  $i=45^\circ$

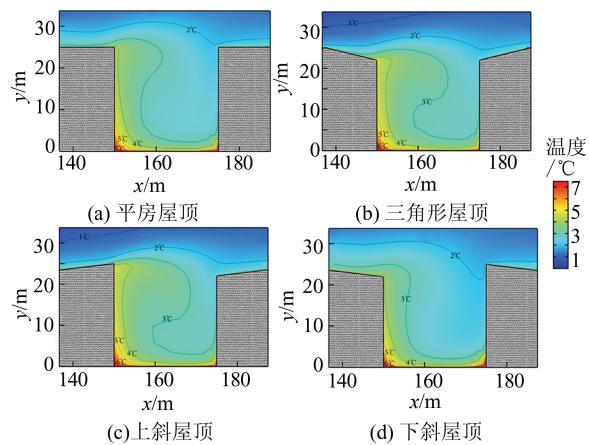


图 8  $i=90^\circ$  街道峡谷内温度分布

Fig.8 Temperature Fields of Street Canyon at  $i=90^\circ$

当  $i=45^\circ$  时, 太阳直射平房屋顶以及上斜屋顶迎风面, 而对于三角形屋顶以及下斜屋顶, 太阳直射迎风面以及部分地表面, 直射地区壁面温度升高。对于平房屋顶和下斜屋顶峡谷(图 7(a)、7(d)), 越靠近峡谷, 地面温度越高, 最高温度出现在迎风面下部分区域, 这是由于迎风面上部风速较大, 把壁面附近的高温空气带向了迎风面的

下部分,同时由于涡旋的作用导致热量难以扩散,最终在该处形成一个高温区域。对于三角形屋顶和上斜屋顶(图7(b)、7(c)),迎风面下部分区域温度最高。总体而言,当*i*=45°时,下斜屋顶构成的峡谷整体温度最高,上斜屋顶构成的峡谷内部温度最低。

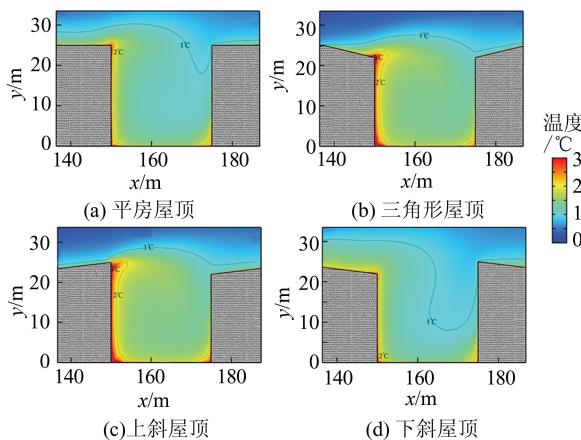


图9  $i=135^{\circ}$  街道峡谷内温度分布

Fig.9 Temperature Fields of Street Canyon at  $i=135^{\circ}$

当*i*=90°时,太阳直射地表面,地表温度升高,此时由于太阳辐射最强,峡谷内温度也比*i*=45°时高。不同屋顶形状构成的峡谷内部温度分布相似,峡谷内存在一个顺时针涡旋,峡谷底部大量的热被带到了背风面,背风面温度高于迎风面,并从地面向上逐渐减弱(图8),背风面以及地面之间温度最高,大量的热量在此处累积,同样在迎风面以及地面之间也存在一个高温区。总

体来说,当*i*=90°时,三角形屋顶和上斜屋顶构成的峡谷温度普遍高于平房屋顶和下斜屋顶。

当*i*=135°时,太阳直射平房屋顶以及上斜屋顶背风面,而对于三角形屋顶和下斜屋顶,太阳直射背风面以及部分地表面,此时太阳辐射强度与太阳入射角*i*=45°时一样,峡谷内温度分布均匀,从背风面到迎风面温度逐渐降低,此时背风面温度最高,热量在此处累积,三角形屋顶和上斜屋顶的高温区域更加明显,而下斜屋顶峡谷内温度低。

由图4~9可以发现,峡谷内流体结构对温度分布有着重要影响,当峡谷内流体结构近似时,温度分布也趋于一致。

进一步比较12种情况下街道峡谷内温度分布,探讨人行高度*y*=2 m时峡谷内温度(图10)。图10表明,峡谷内温度呈现中间低、两边高的趋势,即峡谷迎风面和背风面温度总高于峡谷内部温度,当*i*=45°时,迎风面温度比背风面温度高;当*i*=90°、135°时,背风面温度高于迎风面。由图10(a)可以看出,不同的太阳入射角对峡谷内温度分布有着重要影响,人行高度下峡谷内大部分区域*i*=45°比*i*=135°峡谷内温度高。三角形屋顶在迎风面的温差最大达到4 °C。图10(b)是3种太阳入射角下峡谷内的平均温度。可以看出,三角形屋顶在人行高度下温度都处于高值,而下斜屋顶在背风面以及峡谷中部温度最低,但在靠近迎风面时,温度会急剧上升并达到最高,而平房屋顶构成的峡谷在人行高度下都处于较低值,表明平房屋顶更有利地减轻城市热岛效应。

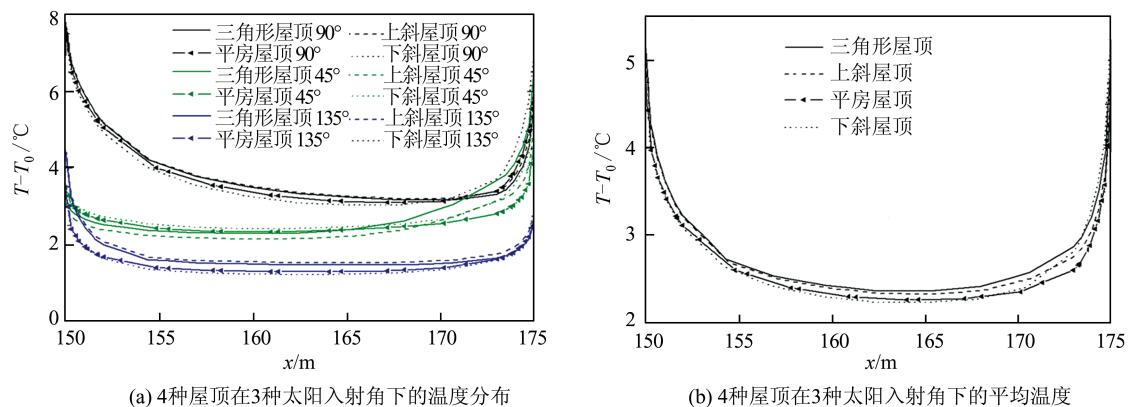


图10 人行高度下街道峡谷内温度分布

Fig. 10 Temperature Fields in the Street Canyon with Pedestrian Height

#### 4 结语

本文针对4种屋顶形状的建筑构建了一个二维数值模型,模拟了街道峡谷高宽比  $W/H=1$  的

不同屋顶形状下峡谷流场以及温度分布,同时考虑太阳的影响,模拟了不同太阳入射角下城市街道峡谷的风速和温度分布。实验表明,模型能较好地进行城市微环境模拟,并得到如下结论:

1) 峡谷内流场结构对城市热效应有着重要影响, 在热效应作用下, 建筑屋顶形状可以通过改变建筑上方流场的分布来影响峡谷内流场分布, 进而影响峡谷内温度分布。

2) 当太阳辐射强度以及来流风速风向不变时, 太阳入射角对峡谷内热效应有着重要影响, 相较于太阳直射背风面, 太阳直射迎风面会导致峡谷内空气温度增加 1~2 ℃。在夏季, 太阳直射迎风面时, 行人可以在背风面进行活动; 在其他时段, 行人可以在迎风面进行活动。

3) 综合不同太阳辐射的情况, 平房屋顶建筑物更有利于减轻城市热岛效应, 峡谷内温度分布更加均匀; 对于三角形屋顶构成的峡谷, 峡谷内温度都处于高值; 对于下斜屋顶, 迎风面温度高, 行人可以减少在该方向的活动。

本文构建了峡谷微环境模型, 得到的结论有助于更好地进行城市规划, 但本结论不具备普遍性, 根据不同的城市气候背景将会有所调整, 后续研究可以进一步考虑城市建筑高度、绿化等对城市微气候的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Oke T R. Boundary Layer Climates [J]. *Earth Science Reviews*, 1987, 27(3): 265-272
- [2] Allegrini J, Dorer V, Carmeliet J. Influence of Morphologies on the Microclimate in Urban Neighbourhoods [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2015, 144: 108-117
- [3] Allegrini J, Carmeliet J. Simulations of Local Heat Islands in Zürich with Coupled CFD and Building Energy Models [J]. *Urban Climate*, 2018, 24: 340-359
- [4] Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. Daytime Urban Heat Island Effect in High-Rise and High-Density Residential Developments in Hong Kong [J]. *Energy & Buildings*, 2004, 36(6): 525-534
- [5] Yan Feng, Qin Zhihao, Li Maosong, et al. On Urban Heat Island of Shanghai City from MODIS Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(7): 576-580(闫峰, 覃志豪, 李茂松, 等. 基于 MODIS 数据的上海市热岛效应研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(7): 576-580)
- [6] Cao Liqin, Zhang Liangpei, Li Pingxiang, et al. Simulation Study of Influence of Change of Land Surface Types on Urban Heat Island [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1 229-1 232(曹丽琴, 张良培, 李平湘, 等. 城市下垫面覆盖类型变化对热岛效应影响的模拟研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12): 1 229-1 232)
- [7] Ma Weiwu, Zhang Yi, Wu Chunling, et al. Outdoor Micro-climate of Residential District to Predict Heat Island Potential [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(12): 5 117-5 124(马卫武, 张翼, 吴春玲, 等. 住宅小区室外微气候及热岛潜势分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12): 5 117-5 124)
- [8] Cui Guixiang, Shi Ruifeng, Wang Zhishi, et al. The Simulation of Large Eddy in Urban Atmospheric Micro-environment [J]. *Science in China Press*, 2008, 38(6): 626-636(崔桂香, 史瑞丰, 王志石, 等. 城市大气微环境大涡模拟研究 [J]. 中国科学, 2008, 38(6): 626-636)
- [9] Xie X, Liu C, Leung D Y C. Impact of Building Facades and Ground Heating on Wind Flow and Pollutant Transport in Street Canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(39): 9 030-9 049
- [10] Kwak K H, Baik J J, Lee S H, et al. Computational Fluid Dynamics Modelling of the Diurnal Variation of Flow in a Street Canyon [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 141(1): 77-92
- [11] Ledo L, Kosasih P B, Cooper P. Roof Mounting Site Analysis for Micro-wind Turbines [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(5): 1 379-1 391
- [12] Abohela I, Hamza N, Dudek S. Effect of Roof Shape, Wind Direction, Building Height and Urban Configuration on the Energy Yield and Positioning of Roof Mounted Wind Turbines [J]. *Renewable Energy*, 2013, 50(3): 1 106-1 118
- [13] Mahdavinejad M, Javanroodi K. Impact of Roof Shape on Air Pressure, Wind Flow and Indoor Temperature of Residential Buildings [J]. *International Journal of Sustainable Building Technology & Urban Development*, 2016, 7(2): 87-103
- [14] 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
- [15] Richards P J, Hoxey R P. Appropriate Boundary Conditions for Computational Wind Engineering Models Using the  $k-\epsilon$  Turbulence Model [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1993, 46-47: 145-153
- [16] Yaghoobian N, Kleissl J, Krayenhoff E S. Modeling the Thermal Effects of Artificial Turf on the Urban Environment [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(3): 332-345
- [17] Ashie Y, Kono T. Urban-Scale CFD Analysis in

- Support of a Climate-Sensitive Design for the Tokyo Bay Area[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 174-188
- [18] Uehara K, Murakami S, Oikawa S, et al. Wind Tunnel Experiments on How Thermal Stratification Affects Flow in and Above Urban Street Canyons [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 (10) : 1 553-1 562
- [19] Bottillo S, de Lieto Vollaro A, Galli G, et al. CFD Modeling of the Impact of Solar Radiation in a Tridimensional Urban Canyon at Different Wind Conditions[J]. *Solar Energy*, 2014, 102(4): 212-222

## Impact of Roof Shape on Micro-environment in Street Canyons by Numerical Simulation

TANG Jie<sup>1</sup> ZHANG Shuangxi<sup>1,2</sup> SHAO Zhenfeng<sup>3</sup> ZOU Chenyang<sup>1</sup> YI Xuchong<sup>1</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** With the rapid development of urbanization, the changes of urban micro-environment caused by the underlying surface are becoming obvious. The influence of roof structure on the single physical field (such as wind field or temperature field) in the urban micro-environment has been emphasized, while the coupling of two physical fields has been neglected. This paper introduces a model to study the effect of building roof shape on urban micro-environment and the model includes two sub-models, that is computational fluid dynamics (CFD) model and radiation (RAD) model. The two-dimensional numerical model was constructed with four roof-shaped structures and three typical solar incidence angles to simulate the micro-environment in street canyons. Then, the mathematical-physical model was validated by comparing the results of wind tunnel experiment. The results show that the model can simulate urban micro-environment. Moreover, flat roof buildings are more conducive to mitigating the urban heat island effect, and the canyon heat island effect formed by triangular roofs is the strongest, while the downward roof buildings are bad for the heat diffusion on the windward side.

**Key words:** urban micro-environment; street canyon; numerical simulation; building roof shape

**First author:** TANG Jie, postgraduate, specializes in numerical simulation of urban geophysics. E-mail: jietang@whu.edu.cn

**Corresponding author:** ZHANG Shuangxi, PhD, professor. E-mail: shxzhang@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41874169, U1939204); Wuhan Multi-factor Urban Geological Survey Demonstration Project.

**引文格式:** TANG Jie, ZHANG Shuangxi, SHAO Zhenfeng, et al. Impact of Roof Shape on Micro-environment in Street Canyons by Numerical Simulation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6):888-894. DOI:10.13203/j.whugis20180457(唐洁, 张双喜, 邵振峰, 等. 屋顶形状对街道峡谷微环境影响的数值模拟研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6):888-894. DOI:10.13203/j.whugis20180457)