

树冠尺寸与建筑高度对街谷通风与污染物扩散的影响

张震, 黄远东, 崔鹏义, 刘宇辰, 罗杨

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 采用经风洞实验验证的数值模型(标准 $k-\varepsilon$ 模型)研究了树冠尺寸与建筑高度改变对街谷内自然通风及污染物扩散的影响。考虑了3种树冠尺寸与4种街谷结构, 并采用无量纲浓度 K 与空气交换率 ACH 分别对街道峡谷内污染程度与通风性能进行评估。结果表明, 建筑高度与树冠尺寸改变会显著影响街谷内气流流动结构。上游建筑高度增加与树冠尺寸增大不利于街谷内的环境通风与特定区域的污染物扩散。树冠尺寸的减小会增强街道峡谷的通风性能, 从而改善街道峡谷内的空气质量, 但在一些特定结构的街道峡谷内, 树冠尺寸的改变对 ACH 的影响并不明显。

关键词: 街道峡谷; 树冠尺寸; 建筑高度; 流动结构; 污染物扩散; 空气交换率

中图分类号: X 51

文献标志码: A

Effects of tree-canopy size and building height on ventilation and pollutant diffusion in street canyons

ZHANG Zhen, HUANG Yuandong, CUI Pengyi, LIU Yuchen, LUO Yang

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The effects of canopy size and building height on natural ventilation and pollutant diffusion in street canyons were studied using the numerical model (standard $k-\varepsilon$ model) validated by wind tunnel experiments. Three canopy sizes and four street-canyon structures were considered, and the dimensionless concentration (K) and air exchange rate (ACH) were adopted to evaluate the pollution degree and ventilation performance of the street canyons. The results show that the change of building height and canopy size can significantly affect the air flow structure and environmental ventilation in street canyons. Here, the increase of the upstream building height and canopy size is not conducive to the environmental ventilation and the diffusion of pollutants in specific areas of the street canyons. The reduction of canopy size can enhance the ventilation performance of street canyons and improve the air quality therein. However, in some street canyons with specific configurations, the effect of canopy size change on ACH is not obvious.

收稿日期: 2021-12-11

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(20dz1204008)

第一作者: 张震(1994-), 男, 硕士研究生。研究方向: 大气污染物控制。E-mail: zhangzhen940202@163.com

通信作者: 罗杨(1991-), 女, 讲师。研究方向: 环境风洞技术、计算流体力学。E-mail: luoyang@usst.edu.cn

Keywords: street canyon; tree-canopy size; building height; flow structure; pollutant diffusion; air exchange rate

街道峡谷通常指沿着两侧连续排列的建筑物之间相对狭窄的街道^[1]，由于汽车尾气排放和有限的环境通风，街道峡谷成为城市大气环境中污染严重的区域^[2]。迄今为止，已有研究通过数值模拟、风洞实验等手段对街道峡谷内通风及污染物扩散情况进行了详细的探讨，结果表明，影响街道峡谷内通风与污染物扩散的因素很多。例如，街道峡谷高宽比^[3-5]、建筑布局^[6-7]、建筑高度^[8-9]、架空结构^[10-12]、壁面热^[13-15]及屋顶形状等^[16-18]。

在城市发展更新过程中，以高楼代替低矮建筑是城市建设的主要措施，因此，在城市地区普遍存在着街道峡谷的非对称结构，其对城市大气环境的影响不容忽视^[19]，很多学者也对此展开了大量的研究。Li等^[20]在建筑高度对街谷内污染物分布影响的研究中发现，在升阶式街谷中，逆风建筑变高导致了街谷内污染情况的恶化。另外，当降阶式街谷中的迎风建筑物升高时，污染物浓度仅在较小风速下增加。Reiminger等^[21]进一步研究了降阶式街谷内逆风建筑高度与街谷宽度变化的影响，结果表明，街谷内气流结构受建筑高度和街谷宽度的影响显著。然而以往这些研究主要针对街谷长宽比、建筑长度比、建筑高度比等方面进行探讨，降阶式结构和街道绿化特征的结合并没有得到太多的关注。树木绿化是城市街道的重要元素，其对街道峡谷内自然通风与污染物扩散有着重要的影响。Buccolieri等^[22]在研究中发现，与无树木情况相比，有树木时街谷背风壁附近的污染物浓度较大，迎风壁附近的污染物浓度稍低。同时在低风速下，树木对污染物浓度的影响比在高风速下更显著。而树木种植密度和树冠孔隙度对污染物浓度的影响较小。另有研究引入空气交换率ACH对树干高度不同的街道峡谷内的通风性能进行了评估，发现当树木增加到一定高度时，ACH会随之增大^[23]。尽管关于树木绿化对街谷内污染物扩散的影响研究已相当广泛，但绝大部分是围绕对称结构街谷展开，未对非对称街谷进行详细的研究，同时也很少考虑树木树冠尺寸变化的影响。

本文利用经风洞实验验证的CFD数值模型，研究树冠尺寸与建筑高度变化对降阶式街道峡谷

内自然通风与污染物扩散的影响。研究结果能从有利于街道峡谷内通风与污染物扩散的角度出发，为城市街道绿化的修剪提供一定理论指导。

1 研究方法

1.1 物理模型

如表1所示，考虑4种上、下游建筑高度比 $H_A/H_B=1, 2, 3, 1.5$ 及3种不同树冠尺寸(3×4 (小型)， 6×8 (中型)， 9×12 (大型))，采用1:100的缩尺比建立以树冠、建筑、线源为主要元素的3D降阶式街道峡谷模型(图1(以 $H_A/H_B=2$ 的街谷为例))，共计12种工况。如图1(a)—1(c)所示，其中，建筑参考高度 $H=0.24\text{ m}$ (实际尺寸为24 m)，街谷宽度 $W=H$ ，街谷长度 $L=7.5H$ ，街谷地面设置4条具有相同源强度的平行线源，以恒定速率连续释放CO气体，以模拟四车道道路上的交通排放。每条线源的宽度和高度均为 $0.021H$ (0.05 m)，长度超出街谷末端 $0.92H$ (0.22 m)(以考虑街道交叉口的污染物排放)^[24]。树冠沿街谷y轴线延伸，距地面高均为 $0.167H$ (0.04 m)，大中型树冠距离两侧建筑壁面距离为 $0.042H$ (0.01 m)，而小型树冠则为 $0.167H$ 。

表1 物理模型参数设置
Tab.1 Parameter settings of physical model

上游建筑与下游建筑高度比 (H_A/m)/(H_B/m)	树冠尺寸 (宽/cm)×(高/cm)
1($H_A=0.12, H_B=0.12$)	$3\times4, 6\times8, 9\times12$
2($H_A=0.24, H_B=0.12$)	$3\times4, 6\times8, 9\times12$
3($H_A=0.36, H_B=0.12$)	$3\times4, 6\times8, 9\times12$
1.5($H_A=0.36, H_B=0.24$)	$3\times4, 6\times8, 9\times12$

1.2 数值模型

1.2.1 控制方程

降阶式街谷内的三维稳态流动采用标准k-ε模型与标准壁函数进行求解，控制方程为^[25]

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'iu'j}) + \nu \nabla^2 u_i + g_i \tag{2}$$

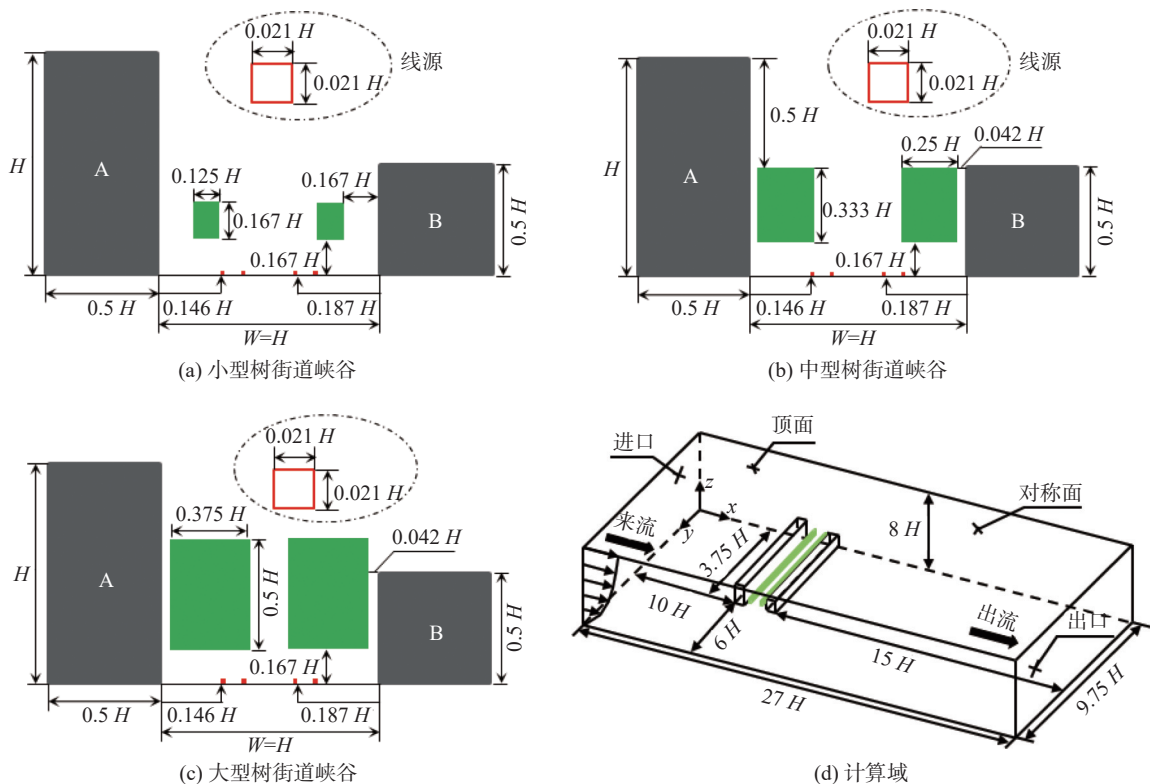


图1 街道峡谷模型

Fig.1 Street canyon model

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{\varepsilon 1} \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] \quad (4)$$

式中: x_i, x_j 为笛卡尔坐标; u_i, u_j 为流体在 i 和 j 方向上的时均速度; ρ 为空气密度; p 为空气压强; g_i 为 i 方向的重力; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; ν_t 为湍流黏性系数; $-\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力; 经验常数 $\{C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon\} = \{1.44, 1.92, 1.0, 1.3\}$ 。

污染物对流扩散方程为

$$u_j \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_{\alpha, m} + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_j} \right) + S_{\alpha, p} \quad (5)$$

式中: C_α 为污染物 α 的浓度; $D_{\alpha, m}$ 为污染物 α 在混合物中的分子扩散系数; $S_{\alpha, p}$ 为污染物 α 的源项; Sc_t 为湍流施密特数 (取 0.7)。

采用 ANSYS Fluent 14.5 软件进行数值计算, 其中, 控制方程应用有限体积法 (FVM) 离散求解, 压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法与二阶迎风格式, 各变量收敛残差设置为 1×10^{-6} 。

1.2.2 树冠模型

利用 Fluent 多孔介质条件对树冠进行建模^[22],

通过在标准流体流动方程中添加动量源项来实现树冠的模拟。源项由两部分组成: 黏性损失项 $\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j \right)$ 与惯性损失项 $\left(\sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right)$, 具体如式 (6) 所示。

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (6)$$

式中: S_i 为动量方程的源项; $|v|$ 为流体速度; v_j 为 x, y, z 方向速度分量; D_{ij} 与 C_{ij} 为速度矩阵; ρ 为空气密度。

1.2.3 计算域与网格

计算域采用对称域, 图 1(d) 为计算域示意图, 入口边界采用速度入口条件 (velocity inlet), 距离上游建筑迎风面 $10H$, 基于式 (7)~(9), 速度幂律分布 $u(z)$ 、湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 应用于入口边界^[26]; 出口边界 (采用 outflow 条件) 与下游建筑背风面距离为 $15H$; 上边界 (采用 symmetry 条件) 距离建筑顶部 $7H$, 建筑壁面及地面均设置为壁面无滑移的边界条件 (wall)。

$$\frac{u(z)}{U_{\text{ref}}} = \left(\frac{z}{H} \right)^{0.187} \quad (7)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (9)$$

式中： $u(z)$ 为 z 高度的平均水平速度； U_{ref} 为建筑参考高度 H 处的平均水平速度，本文 $U_{\text{ref}}=1.5\text{ m/s}$ ；基于建筑高度 $H=0.24\text{ m}$ 的参考雷诺数 $(Re=\frac{U_{\text{ref}}H}{\nu})$ 大小为 2.3×10^4 ，满足雷诺数独立； u_* 为摩擦速度， $u_*=0.54\text{ m/s}$ ； δ 为边界层厚度， $\delta=0.5\text{ m}$ ； κ 为卡门常数， $\kappa=0.4$ 。

使用六面体网格对计算域进行离散(图2)。在 $0.5H$ 高度以下的街道峡内部创建大小相等的网格单元，其中，各网格单元在 x, y, z 轴向上的长度分别为 $\delta x=0.021H, \delta y=0.042H, \delta z=0.021H$ 。对于 $0.5H$ 高度以上， $1.5H$ 高度以下的街谷内部区域， x 与 y 方向上的网格单元尺寸不变($\delta x=0.021H, \delta y=0.042H$)， z 方向上2个连续网格单元之间采用1.04的膨胀比。对于远离街道峡谷的网格，其中， x 轴向上2个连续网格单元之间的膨胀比采用

1.03， y 与 z 轴向上的膨胀比均为1.05。研究的网格总数量为216万。

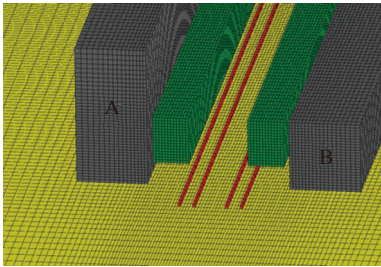


图2 网格划分
Fig.2 Mesh generation

1.3 模型验证

采用德国 Karlsruhe 大学的风洞实验数据对本文模型进行验证^[27]。CFD 模型采用了 Karlsruhe 风洞实验的有关条件^[28-29]，应用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行数值计算。图3显示了双排植树情况下，街道峡谷背风墙和迎风墙 $y/H=0, 1.26, 3.38$ 这3个不同位

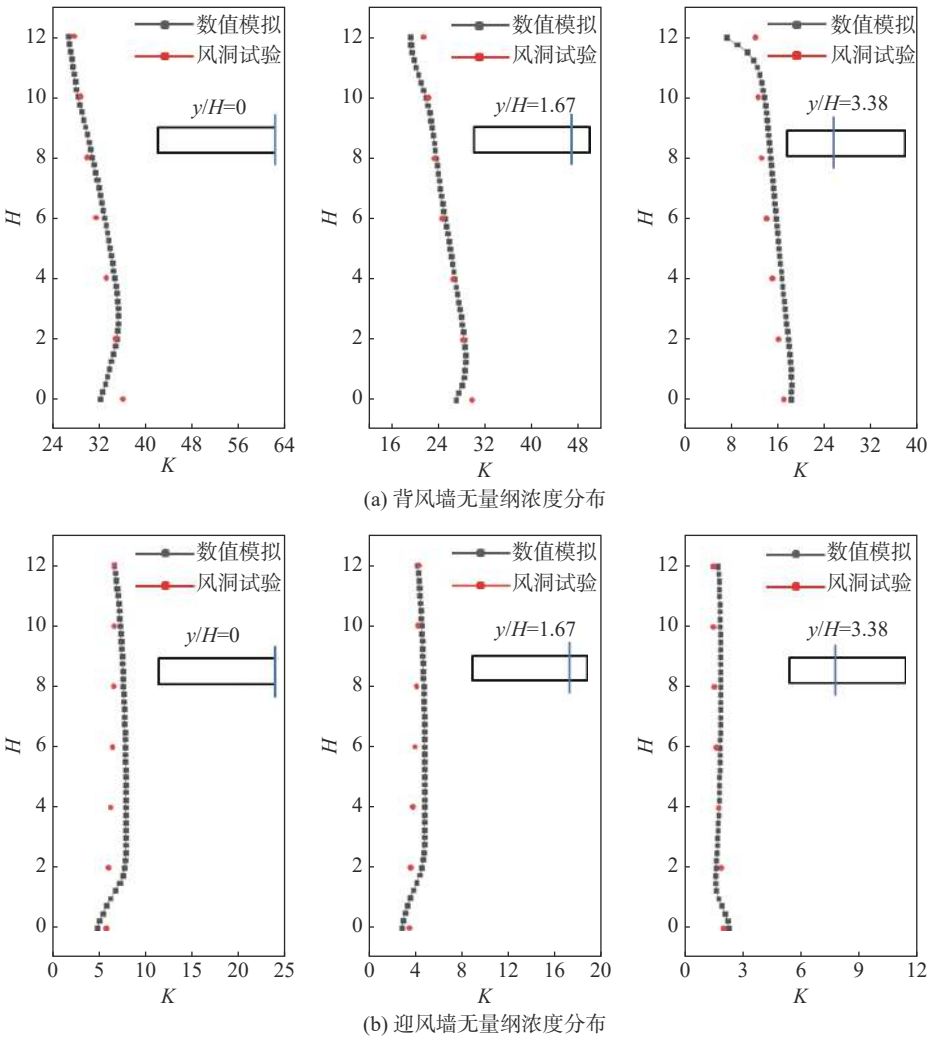


图3 不同位置处数值模拟计算值与风洞实验测量值

Fig.3 Numerical simulation values and wind tunnel measurements at different positions

置处对应垂直线上风洞实验测量值与无量纲污染物浓度 K 的计算值分布。无量纲浓度 K 定义为^[23]

$$K = \frac{CU_{\text{ref}}Hl}{Q_e} \tag{10}$$

式中： C 为污染物的体积分数； l 为线源长度（ $l=2.24\text{ m}$ ）； Q_e 为气态污染物（此处采用 SF_6 ）释放源强。

分析图3可以观察到各位置上的计算值与实验测量值非常吻合。为了量化数值模型的性能，选择归一化均方误差（NMSE）、分数偏差（FB）、在观测值两倍因子内的预测分数（FAC2）和皮尔逊相关系数（R）对数值模型计算值和风洞实验数据之间的关联程度进行了统计学评估^[30]。由表2可知，各验证指标都在规定标准范围内。综上，本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型研究街道峡谷内的气流运动和污染物扩散是可靠的。

表2 数值模型评估指标

位置	FB	NMSE	FAC2	R
背风墙(A墙)	0.032	0.011	1.051	0.872
迎风墙(B墙)	0.087	0.023	1.134	0.846
标准范围	[-0.3, 0.3]	<1.5	[0.5, 2]	>0.8

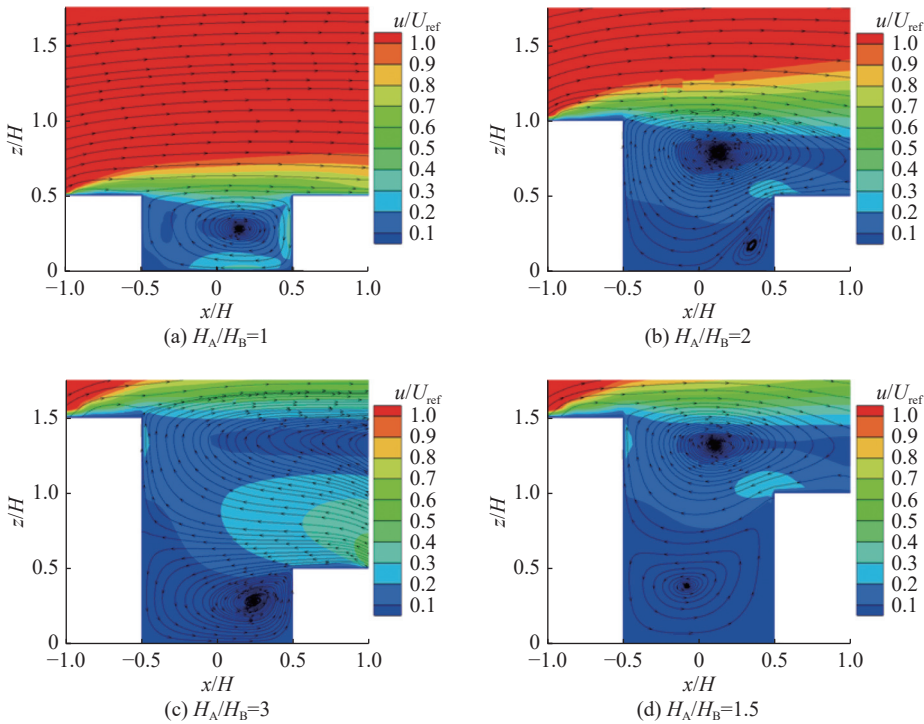


图4 小型树冠街道峡谷中心垂直面流场分布

Fig.4 Flow field distribution in central vertical plane of small tree-canopy street canyon

2 结果与讨论

2.1 街道峡谷内流场变化与分析

图4, 5, 6分别为小、中和大型树冠的街道峡谷中心垂直面的流场分布。对于小型树冠街谷（图4），当 $H_A/H_B=1$ 时，街谷内产生1个顺时针涡，涡心处气流流速较低，而壁面与地面附近的流速较快；当上游建筑高度增加时，顺时针涡尺寸变大，涡心上移，并且街谷内部生成1个新的逆时针涡，逆时针涡附近（下游建筑高度以下区域）的气流流速明显低于上部区域；对比图4(c)与4(d)可知，当上游建筑高度不变时，下游建筑的升高会导致顺时针涡涡心向上游偏移。相较小型树冠街谷，中型树冠街谷内的气流流动结构没有发生显著改变，但在 $H_A/H_B=2$ 的街谷内逆时针涡消失（图5(b)）。随着树冠尺寸的进一步增大， $H_A/H_B=1$ ，街谷内的顺时针涡消失， $H_A/H_B=3$ ，街谷内的逆时针涡结构严重变形，涡心向迎风墙偏移，而 $H_A/H_B=2$ 与 $H_A/H_B=1.5$ 街谷内的流动结构没有发生显著变化。

图7, 8, 9分别为小、中和大型树冠街道峡谷人行呼吸高度面的流场分布。对于小型树冠街谷（图7），当 $H_A/H_B=1$ 时，街谷 y 轴正方向出口处生成一个顺时针涡，负方向出口处则生成一个逆

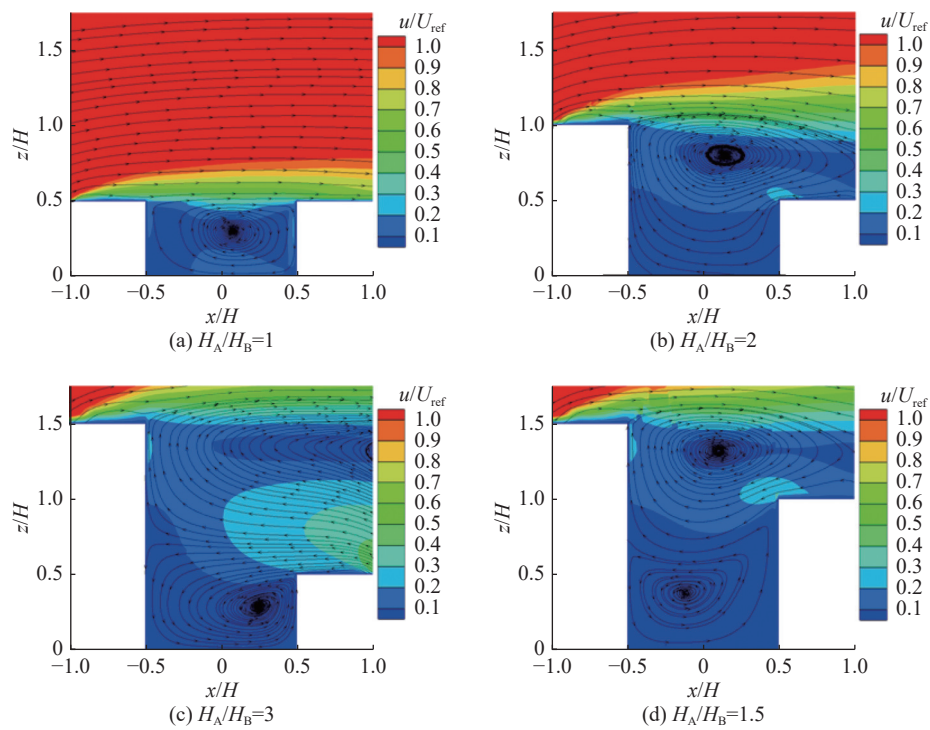


图 5 中型树冠街道峡谷中心垂直面流场分布

Fig.5 Flow field distribution in central vertical plane of medium tree-canopy street canyon

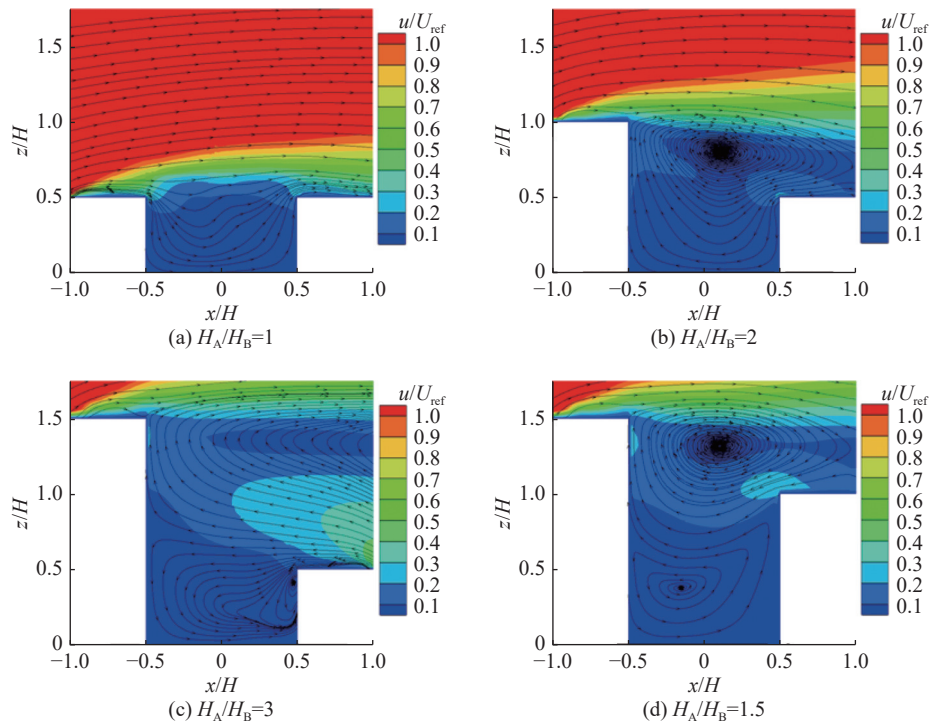


图 6 大型树冠街道峡谷中心垂直面流场分布

Fig.6 Flow field distribution in central vertical plane of large tree-canopy street canyon

时针涡，街谷内气流主要向背风墙方向流动，而在大型树冠街谷内，街谷内气流则向迎风墙流动；当 $H_A/H_B=2$ 时，街谷内产生对向流动，气流被分成两部分，一部分往背风墙方向流动，一部

分往迎风墙流动，而在中型与大型树冠街谷内，同样观察到对向流动，但流向均往背风墙方向。随着上游建筑继续增高，即 $H_A/H_B=3$ 时，街谷内气流对向流动发展为反向流动，分别流向两端出

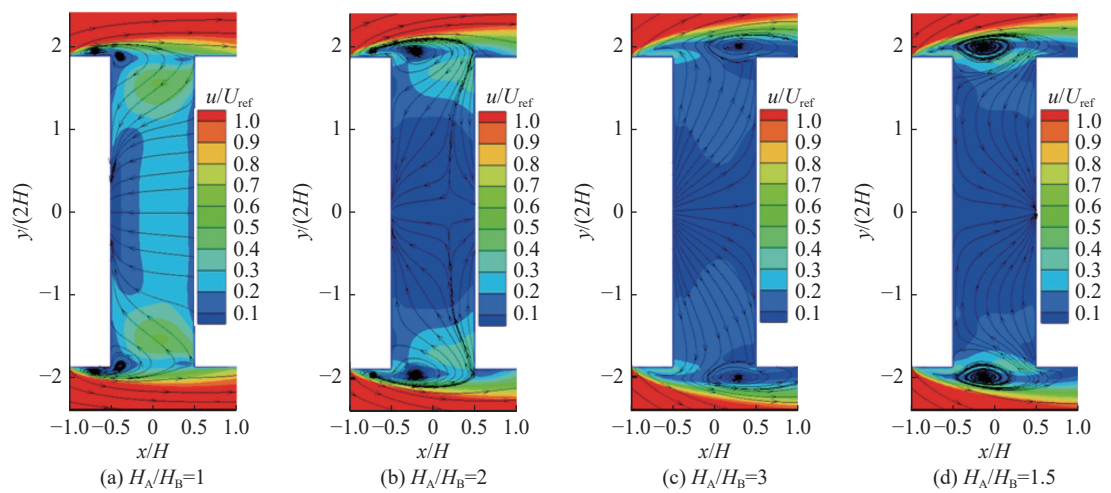


图7 小型树冠街道峡谷人行呼吸高度面流场分布

Fig.7 Flow field distribution at pedestrian breathing height in small tree-canopy street canyon

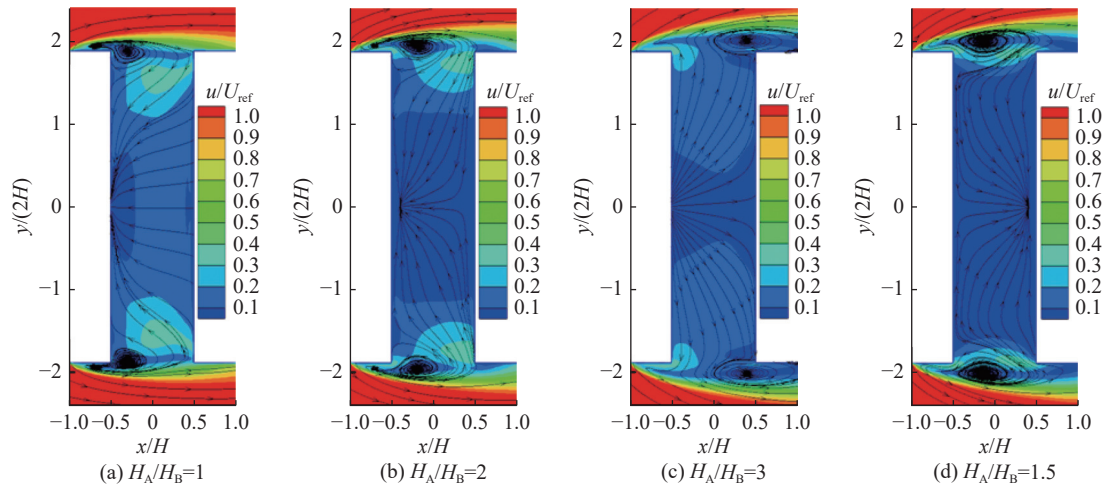


图8 中型树冠街道峡谷人行呼吸高度面流场分布

Fig.8 Flow field distribution at pedestrian breathing height in medium tree-canopy street canyon

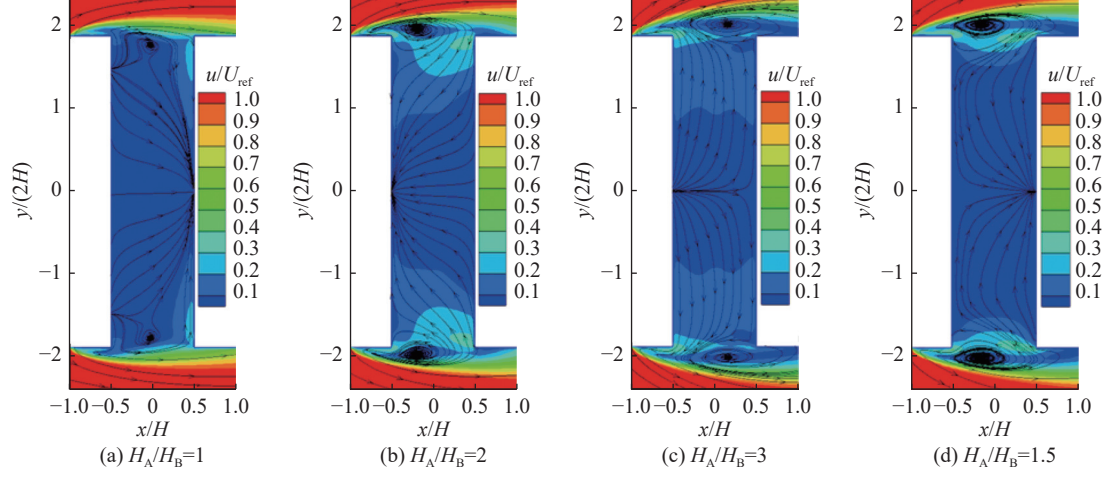


图9 大型树冠街道峡谷人行呼吸高度面流场分布

Fig.9 Flow field distribution at pedestrian breathing height in large tree-canopy street canyon

口；当上游建筑增高后保持不变而下游建筑增高，即 $H_A/H_B=1.5$ 时，街谷内气流反向流动发展为对向流动，气流主要向迎风墙流动。通过对比分析不同树冠尺寸的街谷内的流动情况可以看出，

树冠尺寸的增加能够明显改变气流的流速与流动结构,这在 $H_A/H_B=1, 2$ 的街谷尤为明显。

2.2 街道峡谷内污染物浓度分布

图 10, 11, 12 分别为小、中和大型树冠街道

峡谷中心垂直面的污染物浓度分布,结合图 4, 5, 6 分析可知,街谷内污染物的分布主要受气流流动结构的影响。对于小型树冠街谷(图 10),当 $H_A/H_B=1$ 时,污染物在街谷内顺时针涡的作用下

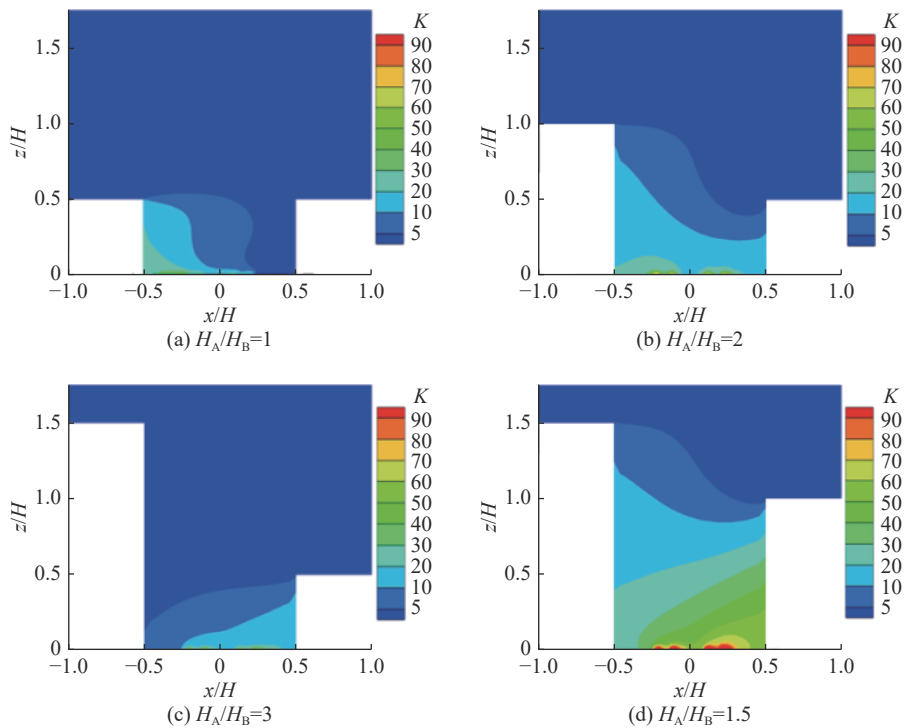


图 10 小型树冠街道峡谷中心垂直面污染物分布

Fig.10 Pollutant distribution in central vertical plane of small tree-canopy street canyon

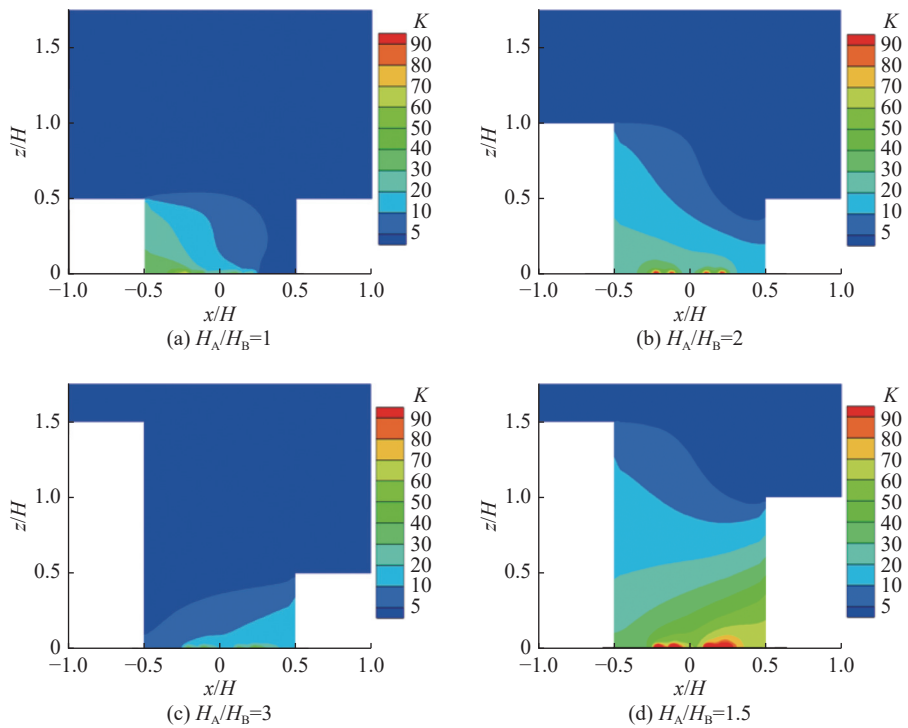


图 11 中型树冠街道峡谷中心垂直面污染物分布

Fig.11 Pollutant distribution in central vertical plane of medium tree-canopy street canyon

向背风墙一侧扩散。随着上游建筑的升高, 街谷内污染物受逆时针涡的影响, 开始向迎风墙一侧扩散, 导致迎风墙附近的污染物浓度升高, 这在 $H_A/H_B=3$ 与 $H_A/H_B=1.5$ 的街谷内尤为明显。由于与小型树冠街谷内的流动结构相比变化不大, 中型树冠街谷内的污染物分布趋势与小型街谷内基本相似。但在大型树冠街谷内, 尤其是 $H_A/H_B=1$ 时, 街谷内顺时针涡消失, 气流向迎风墙流动, 污染物随气流向该侧扩散, 导致迎风墙一侧污染程度加剧。显然, 在不同结构街谷内, 树冠尺寸变

化对污染物分布情况的影响程度不同, 在 $H_A/H_B=2, 3, 1.5$ 的街谷内, 树冠尺寸改变, 街谷内污染物分布趋势变化不大, 而在 $H_A/H_B=1$ 的街谷内, 树冠尺寸增为大型时, 污染物分布情况发生显著改变。

图 13, 14, 15 分别为小、中和大型树冠街道峡谷人行呼吸高度面的污染物浓度分布, 人行呼吸高度面污染物的分布同样受气流运动的主导。当 $H_A/H_B=1$ 时, 对于小型与中型树冠街谷, 由于气流向背风墙方向流动, 污染物随之向背风墙一

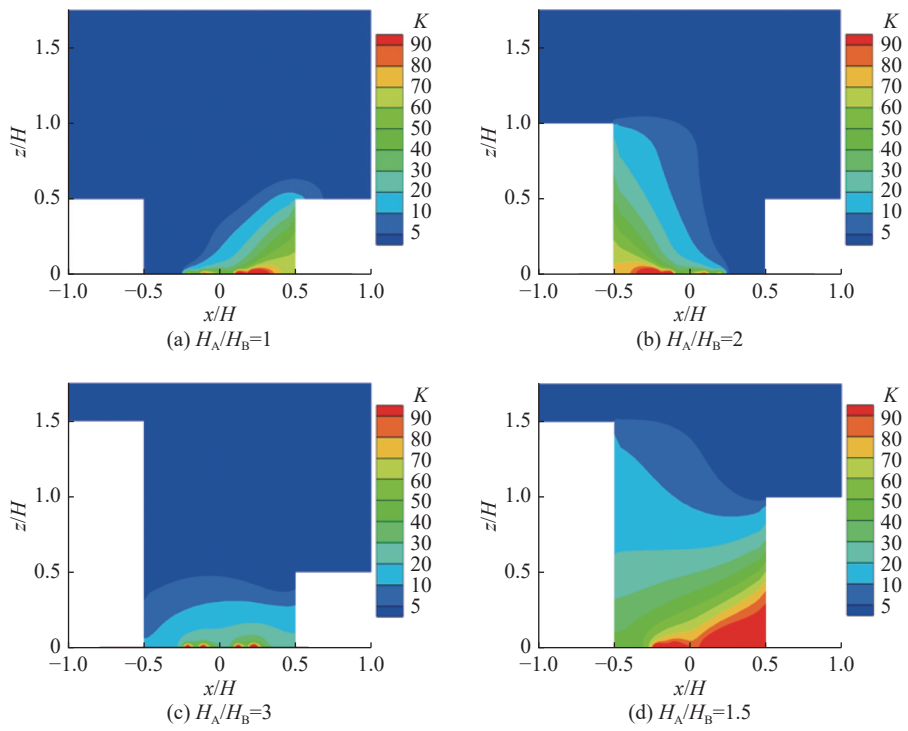


图 12 大型树冠街道峡谷中心垂直面污染物分布

Fig.12 Pollutant distribution in central vertical plane of large tree-canopy street canyon

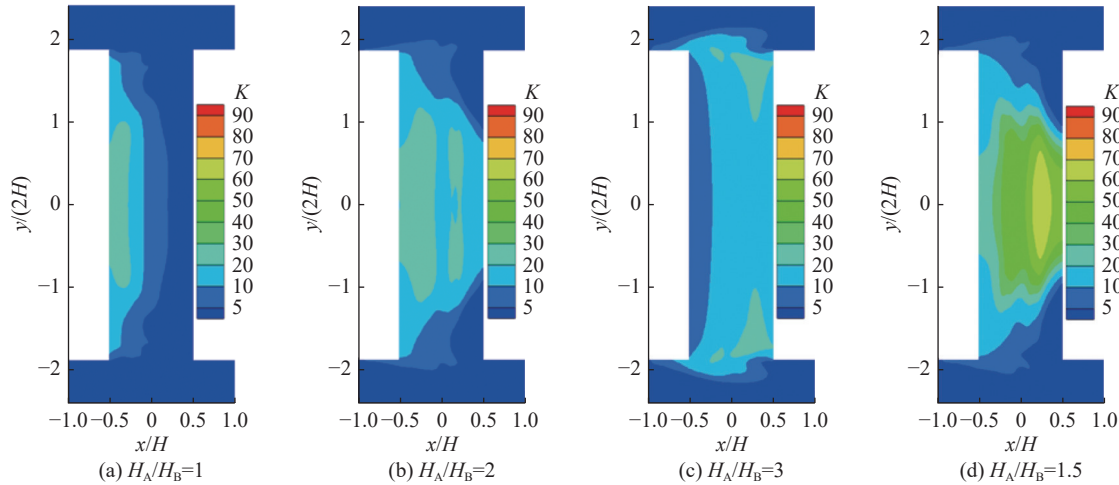


图 13 小型树冠街道峡谷人行呼吸高度面污染物分布

Fig.13 Pollutant distribution at pedestrian breathing height in small tree-canopy street canyon

侧扩散；当 $H_A/H_B=2$ 时，人行呼吸高度面的污染物仍主要分布在背风墙一侧，但小型树冠街谷内的部分污染物有明显向迎风墙扩散的趋势。随着上游建筑继续增高，即 $H_A/H_B=3$ 时，街谷内污染物在气流的作用下向街谷出口端扩散，导致街谷出口附近的污染物浓度升高。而当 $H_A/H_B=1.5$ 时，街谷内气流对向流动，街谷中部的污染程度明显高于其他区域。对比相同结构不同树冠尺寸的街谷，随着树冠尺寸的增加，对应结构的街谷内污染物浓度明显上升，高浓度污染区域的范围明显扩大，这是由于树冠的阻滞作用抑制了污染物的扩散。

2.3 街道峡谷内 ACH 的评估分析

空气交换率 ACH 表示单位时间内街道峡谷和环境大气之间的空气交换量。空气从街谷排出表示为 ACH_+ ，进入街谷则表示为 ACH_- 。对于本研

究中的 3D 街道峡谷，气流主要在街谷两端出口与顶部与环境空气发生交换， ACH_+ 与 ACH_- 的计算定义为^[23,31-33]

$$ACH_+ = (ACH_{t+}) + (ACH_{s1+}) + (ACH_{s2+}) \tag{11}$$

$$ACH_- = (ACH_{t-}) + (ACH_{s1-}) + (ACH_{s2-}) \tag{12}$$

式中： ACH_t 表示穿过街谷顶部； ACH_{s1} 表示穿过街谷 y 轴正向出口平面； ACH_{s2} 表示穿过街谷 y 轴负向出口平面。

而平面上的 ACH 由平均值 ($\overline{ACH}$) 和脉动值 (ACH') 组成(式(13))，其中， $\overline{ACH}$ 由平均速度引起， ACH' 由脉动速度引起。

$$ACH = \overline{ACH} + ACH' \tag{13}$$

$$ACH'_+ = ACH'_- = \frac{1}{\sqrt{6}} \int_{\Gamma} \sqrt{k} d\Gamma \tag{14}$$

式中： Γ 表示对应平面的面积， k 为湍动能。

图 16 为各工况下街道峡谷内的空气交换率

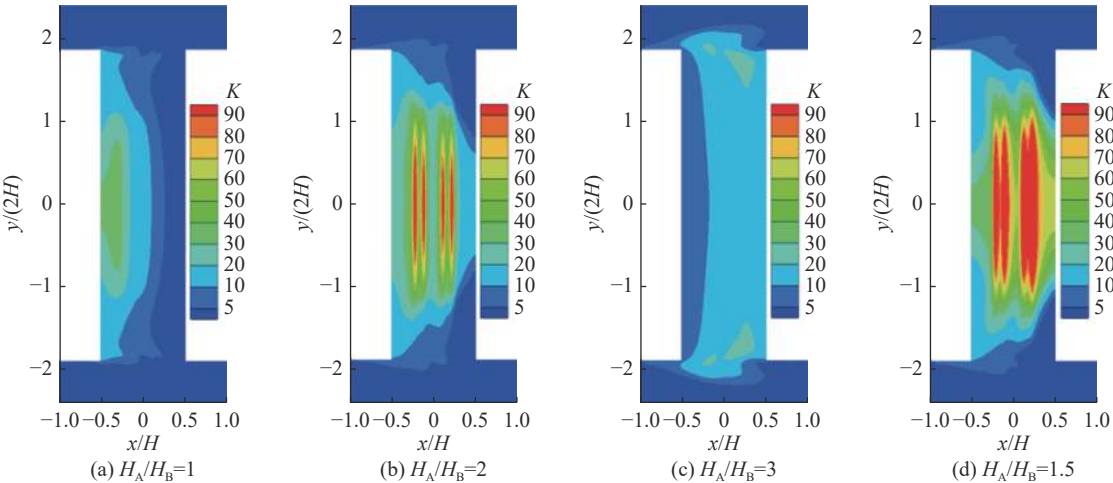


图 14 中型树冠街道峡谷人行呼吸高度面污染物分布

Fig.14 Pollutant distribution at pedestrian breathing height in medium tree-canopy street canyon

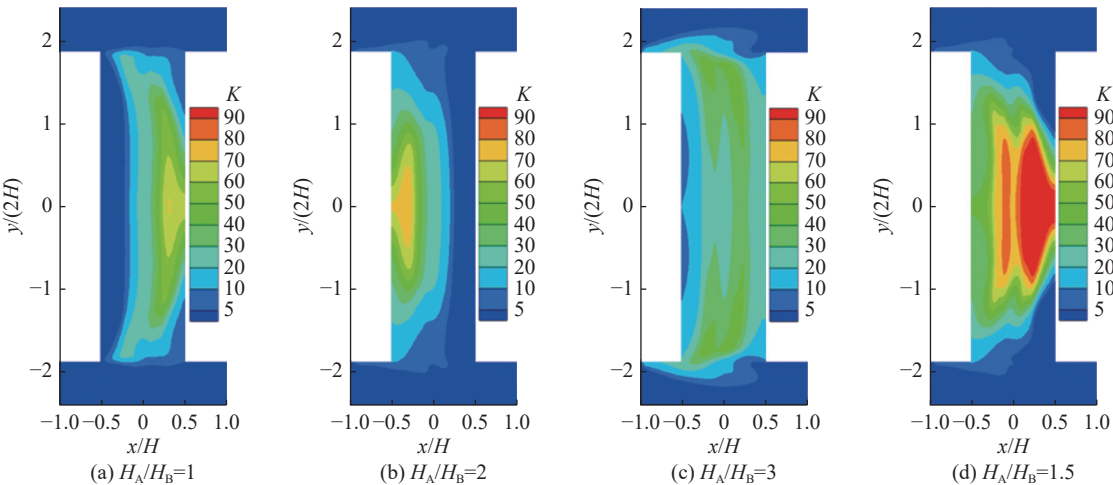


图 15 大型树冠街道峡谷人行呼吸高度面污染物分布

Fig.15 Pollutant distribution at pedestrian breathing height in large tree-canopy street canyon

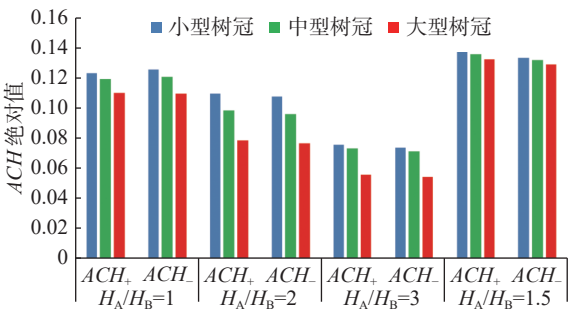


图 16 街道峡谷内的空气交换率
Fig. 16 ACH in street canyons

ACH 的柱状图。由图 16 可知,对于相同结构的街道峡谷,随着树冠尺寸的增加,街谷内的 ACH 随之降低。其中,当树冠尺寸从小型增大为中型时,在 $H_A/H_B=1, 2, 3, 1.5$ 的街谷内,ACH 分别降低了 3.40%, 10.53%, 3.27%, 0.99%,而当树冠尺寸从小型增大为大型时,ACH 则分别降低了 10.61%, 28.37%, 26.45, 3.34%。进一步分析可知,在各结构街谷内,树冠尺寸从小型改变为中型与大型时,ACH 分别平均降低了 7.00%, 19.45%, 14.86%, 2.16%。显然,在不同结构的街谷内,树冠尺寸对 ACH 的影响程度不同,尤其在 $H_A/H_B=1.5$ 的街谷内,树冠尺寸改变引起的 ACH 变幅很小。同时,街谷结构的变化同样会显著影响街谷内的 ACH。当树冠尺寸不变,上游建筑升高时,街谷内的 ACH 明显降低,其中, $H_A/H_B=3$ 街谷内的 ACH 相较 $H_A/H_B=1$ 街谷平均降低了 42.4%,而在此情况下将下游建筑升高,即 $H_A/H_B=1.5$ 时,街谷内的环境通风能力得到明显提升,此时街谷内的 ACH 相较 $H_A/H_B=3$ 街谷最大升高了 139.1%,平均升高了 99.1%。

3 结 论

采用经风洞实验数据验证的标准 $k-\epsilon$ 模型,通过数值模拟研究了垂直迎风条件下,树冠尺寸与建筑高度变化对街道峡谷内环境通风和交通污染物扩散的影响,得到以下结论:

a. 建筑高度的变化对街道峡谷内的气流流动结构有重要影响,因此,在不同建筑高度的街道峡谷内,污染物的扩散分布情况显著不同。上游建筑的升高会导致街谷中心垂直面逆向涡的生成以及人行呼吸高度面气流流向的改变,此时街谷中心垂直面与人行呼吸高度面上的污染物有明显向迎风墙一侧扩散的趋势。下游建筑抬高则会引

起街谷上方顺时针涡尺寸的变化与涡心的偏移,此时污染物在街谷内的分布范围变广,且在迎风墙一侧浓度较高。

b. 在不同结构的街道峡谷内,树冠尺寸的改变对街谷内气流流动结构与污染物扩散的影响不同。相较 $H_A/H_B=2, 3, 1.5$ 的街谷,在 $H_A/H_B=1$ 街谷内,树冠尺寸变化对气流结构的影响更为显著。在 $H_A/H_B=1$ 街谷内,对比中、小尺寸树冠情况,大型树冠会导致较矮建筑的街谷中心垂直面的顺时针涡消失以及人行呼吸高度面气流流向改变。

c. 街谷内的环境通风情况会因树冠尺寸与建筑高度的改变而发生变化。树冠尺寸增大与上游建筑升高均会导致街谷内 ACH 降低,而下游建筑抬高则会提升街谷内 ACH。为了改善现实街道的通风条件,对于 $H_A/H_B=1, 2, 3$ 的街谷,应尽量减小树冠的尺寸,而对于 $H_A/H_B=1.5$ 的街谷,由于树冠尺寸改变对街谷内通风影响甚小,在考虑经济性的前提下可不对这类街谷内的树冠进行过多的修剪。

研究了不同树冠尺寸与建筑高度对街谷通风与污染物扩散的影响,提出了不同结构的街道峡谷内行道树树冠的最佳修剪方式。对绿化结构进行了初步的探讨,但对实际绿化进行了一定的简化,后续研究将进一步考虑树冠对污染物的去除效果及行道树叶片类型对街谷内流动结构及污染物扩散分布的影响。

参考文献:

[1] VARDOLAKIS S, FISHER B E A, PERICLEOUS K, et al. Modelling air quality in street canyons: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(2): 155–182.

[2] JANHÄLL S. Review on urban vegetation and particle air pollution—deposition and dispersion[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 105: 130–137.

[3] LI X X, BRITTER R E, NORFORD L K, et al. Flow and pollutant transport in urban street canyons of different aspect ratios with ground heating: large-eddy simulation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 142(2): 289–304.

[4] BARATIAN-GHORGHI Z, KAYE N B. The effect of canyon aspect ratio on flushing of dense pollutants from an isolated street canyon[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 443: 112–122.

[5] MEMON R A, LEUNG D Y C, LIU C H. Effects of building aspect ratio and wind speed on air temperatures in urban-like street canyons[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(1): 176–188.

[6] CUI D J, LI X D, LIU J L, et al. Effects of building layouts

- and envelope features on wind flow and pollutant exposure in height-asymmetric street canyons[J]. *Building and Environment*, 2021, 205: 108177.
- [7] BUCCOLIERI R, SANDBERG M, DI SABATINO S. City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(15): 1894–1903.
 - [8] LI Z T, SHI T H, WU Y J, et al. Effect of traffic tidal flow on pollutant dispersion in various street canyons and corresponding mitigation strategies[J]. *Energy and Built Environment*, 2020, 1(3): 242–253.
 - [9] PAPP B, KRISTÓF G, ISTÓK B, et al. Measurement-driven large eddy simulation of dispersion in street canyons of variable building height[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 211: 104495.
 - [10] 任蘇琪, 黄远东, 崔鹏义. 架空建筑街谷内流动与污染物扩散的数值模拟研究 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 368–377.
 - [11] CHEW L W, NORFORD L K. Pedestrian-level wind speed enhancement in urban street canyons with void decks[J]. *Building and Environment*, 2018, 146: 64–76.
 - [12] CHEW L W, NORFORD L K. Pedestrian-level wind speed enhancement with void decks in three-dimensional urban street canyons[J]. *Building and Environment*, 2019, 155: 399–407.
 - [13] HANG J, CHEN X Y, CHEN G W, et al. The influence of aspect ratios and wall heating conditions on flow and passive pollutant exposure in 2D typical street canyons[J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 106536.
 - [14] CHEN L, HANG J, CHEN G W, et al. Numerical investigations of wind and thermal environment in 2D scaled street canyons with various aspect ratios and solar wall heating[J]. *Building and Environment*, 2021, 190: 107525.
 - [15] LIN Y, ICHINOSE T, YAMAO Y, et al. Wind velocity and temperature fields under different surface heating conditions in a street canyon in wind tunnel experiments[J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 106500.
 - [16] ALLEGRI J. A wind tunnel study on three-dimensional buoyant flows in street canyons with different roof shapes and building lengths[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 71–88.
 - [17] YASSIN M F. Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(29): 5220–5229.
 - [18] WEN H, MALKI-EPSTEIN L. A parametric study of the effect of roof height and morphology on air pollution dispersion in street canyons[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 328–341.
 - [19] ADDEPALLI B, PARDYJAK E R. A study of flow fields in step-down street canyons[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2015, 15(2): 439–481.
 - [20] LI Z T, ZHANG H, WEN C Y, et al. Effects of height-asymmetric street canyon configurations on outdoor air temperature and air quality[J]. *Building and Environment*, 2020, 183: 107195.
 - [21] REIMINGER N, VAZQUEZ J, BLOND N, et al. CFD evaluation of mean pollutant concentration variations in step-down street canyons[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 196: 104032.
 - [22] BUCCOLIERI R, GROMKE C, DI SABATINO S, et al. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(19): 5247–5256.
 - [23] HUANG Y D, LI M Z, REN S Q, et al. Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon[J]. *Building and Environment*, 2019, 165: 106385.
 - [24] SALIM S M, BUCCOLIERI R, CHAN A, et al. Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: comparison between RANS and LES[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(2/3): 103–113.
 - [25] HANG J, XIAN Z A, WANG D Y, et al. The impacts of viaduct settings and street aspect ratios on personal intake fraction in three-dimensional urban-like geometries[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 138–162.
 - [26] SALIM S M, CHEAH S C, CHAN A, et al. Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: comparison between RANS and LES[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(9): 1735–1746.
 - [27] HUANG M H, HUANG Y, CAO J J, et al. Study on mitigation of automobile exhaust pollution in an urban street canyon: emission reduction and air cleaning street lamps[J]. *Building and Environment*, 2021, 193: 107651.
 - [28] GROMKE C, RUCK B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon — experimental investigation of the flow and concentration field[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(16): 3287–3302.
 - [29] GROMKE C, BUCCOLIERI R, DI SABATINO S, et al. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations — evaluation of CFD data with experimental data[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(37): 8640–8650.

[13] 王静, 苏宝利, 郭学静, 等. 综合医院医生职业疲劳影响因素的多视角分析 [J]. [医学与哲学](#), 2017, 38(12A): 44–46.

[14] 万荣, 阎瑞霞. 基于粗糙集和模糊层次分析法的客户需求权重确定方法 [J]. [科技管理研究](#), 2018, 38(4): 204–208.

[15] 林贤隆, 陈智. 基于 $M/D/c$ 排队模型的机场管道加油任务分配问题研究 [J]. [舰船电子工程](#), 2019, 39(11): 34–37.

[16] 王文娟, 王季冬. 过度医疗与转诊制: 一个排队论下的博弈模型 [J]. [管理科学学报](#), 2019, 22(2): 63–76.

[17] 黄业文, 邝神芬. 非强占有限优先权 $M/M/n/m$ 排队系统 [J]. [应用概率统计](#), 2018, 34(4): 364–380.

[18] 单琴祺, 岳德权. 具有不耐烦顾客和多重工作休假的排队库存系统 [J]. [数学的实践与认识](#), 2021, 51(4): 133–144.

[19] 王体春, 徐本领. 基于排队论的仓储 AGV 配置和调度分析 [J]. [机械设计与制造](#), 2020(4): 266–269.

[20] 周文慧, 黄伟祥, 吴永忠, 等. 提高顾客等待满意度的两类排队管理策略 [J]. [管理科学学报](#), 2014, 17(4): 1–10.

[21] 李伟伟, 易平涛, 李玲玉. 综合评价中异常值的识别及无量纲化处理方法 [J]. [运筹与管理](#), 2018, 27(4): 173–178.

[22] 李军祥, 藏万斌. 基于耐心阈值下联络中心放弃率的仿真研究 [J]. [系统仿真学报](#), 2021, 33(1): 169–179.

[23] 李楠. 信息不对称下医患信任机制的建立及保障研究 [D]. 大连: 东北财经大学, 2015.

(编辑: 丁红艺)



[上接第 280 页]

[30] MOONEN P, GROMKE C, DORER V, et al. Performance assessment of large eddy simulation (LES) for modeling dispersion in an urban street canyon with tree planting[J]. [Atmospheric Environment](#), 2013, 75: 66–76.

[31] LIU C H, LEUNG D Y C, BARTH M. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation[J]. [Atmospheric Environment](#), 2005, 39(9): 1567–1574.

[32] HUANG Y D, HOU R W, LIU Z Y, et al. Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon[J]. [Aerosol and Air Quality Research](#), 2019, 19(5): 1152–1171.

[33] NAZARIAN N, KLEISSL J. Realistic solar heating in urban areas: air exchange and street-canyon ventilation[J]. [Building and Environment](#), 2016, 95: 75–93.

(编辑: 石 瑛)