

架空建筑街谷内流动与污染物扩散的数值模拟研究

任蘇琪, 黄远东, 崔鹏义

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 研究架空建筑设计对街道峡谷内气流流动和污染物扩散规律的影响。考虑了 4 种不同街谷高宽比 (H/W) 和 3 种架空建筑类型, 利用经风洞实验验证的 CFD 数值模型对上述街谷内流动与污染物扩散规律进行模拟研究。结果表明, 在无架空街谷中, H/W 的增大不利于街谷内污染物扩散。与无架空街谷相比, 架空结构显著改善了街谷内的空气质量。两侧建筑架空结构比单侧建筑架空结构更有利于街谷内污染物扩散, 上游建筑架空结构对街谷内污染物的稀释作用优于下游建筑架空结构。当两侧建筑架空时, 街谷内污染物可降低 90% 以上。架空结构显著增强了街谷近地面的气流流速, 改善了街谷内的空气质量。

关键词: 街道峡谷; 数值模拟; 架空结构; 高宽比; 气流流动; 污染物扩散

中图分类号: TU 241

文献标志码: A

Numerical simulation studies on airflow and pollutant dispersion in street canyons with void decks

REN Suqi, HUANG Yuandong, CUI Pengyi

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

Abstract: To explore the influence of the structure of buildings with void decks on the airflow and pollutant dispersion in street canyons, CFD (computational fluid dynamics) numerical models validated by the wind-tunnel tests were employed by considering four aspect ratios (H/W) and three configurations of buildings with void decks. The results show that the increase of H/W is not conducive to the dispersion of pollutants in the street canyon without any void decks. Compared with the street canyon without any void decks, the structures of building with void decks observable improves the air quality in street canyons. The structure of buildings with void decks on both sides is more propitious to the dispersion of pollutants in the street canyon than the structure of building with a void deck on one side, and the dilution effect of the structure of upstream building with a void deck on the pollutants in the street canyon is better than that of the structure of downstream building with a void deck. The pollutant concentration in the street canyon with void decks at buildings on both sides is reduced by more than 90%. Therefore, the structures of buildings with void decks significantly enhances the airflow in the area near the ground and improves the air quality in street canyons.

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51536006); 上海市科学创新行动计划 (20dz1204008); 上海市青年科技扬帆计划 (18YF1417600)

第一作者: 任蘇琪(1994-), 女, 硕士研究生。研究方向: 大气污染控制。E-mail: 182681809@st.usst.edu.cn

通信作者: 崔鹏义(1986-), 男, 讲师。研究方向: 大气污染控制、环境风洞技术。E-mail: pycui@usst.edu.cn

Keywords: street canyon; numerical simulation; void deck; aspect ratio; airflow; pollutant dispersion

随着我国经济的快速发展, 机动车保有量不断增加, 机动车排放的尾气污染物已成为城市大气污染的重要来源, 也是各种呼吸系统疾病频发的重要原因^[1]。因此, 了解城市环境中尤其是街道峡谷内的气流流动结构及交通污染物的对流扩散规律十分必要。街谷两侧建筑类型、街谷形态、气象条件等因素对街谷内的气流流动及污染扩散有不同的影响^[2-4]。例如, 街谷的几何形状(街谷高宽比 H/W ^[5-7]、长高比 L/H ^[8] 等)和亚热带地区较常见的建筑架空结构是影响街道峡谷内气流流动特性和污染物扩散规律的重要因素。

架空建筑由于其良好的通风防潮功能, 近年来受到广泛关注。在有关架空建筑的研究中, Tse 等^[9] 研究了一系列不同架空结构对行人区风环境的影响, 发现架空结构可以显著改变建筑周围高风速和低风速区域的面积和大小。水滔滔等^[10] 利用风洞实验研究了广东某地底层架空住宅区结构对行人高度处风环境和住宅建筑侧面风压的影响, 结果发现, 住宅区底层架空显著降低了行人高度处风速和住宅二层高度处风压。Du 等^[11] 利用 CFD(computational fluid dynamics) 方法对孤立架空建筑周围风环境进行模拟, 并与无架空建筑周围风环境的结果进行对比, 发现架空结构可以有效提高行人高度处风舒适度。Du 等^[12] 研究了 4 种不同的架空建筑结构在 3 种风向条件下, 对行人高度处风舒适度的影响, 发现在斜风向条件下的风舒适度更佳。目前, 大多数有关建筑架空结构的研究只考虑了架空结构对街谷内的风环境及人体舒适性的影响^[13-14], 而对街谷内有效通风性能与污染扩散影响的综合研究较少。

本文基于现实环境中存在的架空结构, 利用经风洞实验验证的 CFD 数值模型, 研究不同街谷高宽比及不同底层架空结构对街谷内气流流动和污染物扩散的影响, 研究结果可为城市规划、道路交通流调控, 以及城市污染控制提供参考。

1 研究方法

1.1 物理模型

采用 1 : 150 的模型尺寸, 建立了由 4 种不同

的街谷高宽比($H/W=1, 4/3, 5/3$ 和 2)及 3 种不同的架空建筑结构(上游、下游及两侧建筑架空)组合的 16 种工况, 如表 1 所示。图 1(a)为参考工况, 建筑尺寸大小为 $H\times H$, 建筑高度 $H=12\text{ cm}$ (实际尺寸为 18 m), 街谷宽度 $W=H$, 2 条污染源边长均为 $0.03\text{ }H$, 分别位于距离迎风面 $0.42\text{ }H$ 和 $0.58\text{ }H$ 处, 以恒定的速度释放 SF_6 (六氟化硫)来模拟道路上机动车尾气排放, SF_6 作为示踪气体, 具有背景浓度低、无污染、易检测等优点。参照图 1(a)所示的街谷设置, 建立上游、下游和两侧建筑架空的街谷模型, 图 1(b)为上游建筑架空街谷示意图。

本研究中, 来流风垂直于街道峡谷中心轴线, 风速设为 7.0 m/s , 对于每种街谷工况, 参考雷诺数 Re 的计算公式为

$$Re=U_{\text{ref}}H/\nu$$

(1)

表 1 物理模型设置

Tab.1 Physical model setting

建筑架空结构	H/W
无架空结构	1, 4/3, 5/3, 2
上游建筑底层架空	1, 4/3, 5/3, 2
下游建筑底层架空	1, 4/3, 5/3, 2
两侧建筑底层架空	1, 4/3, 5/3, 2

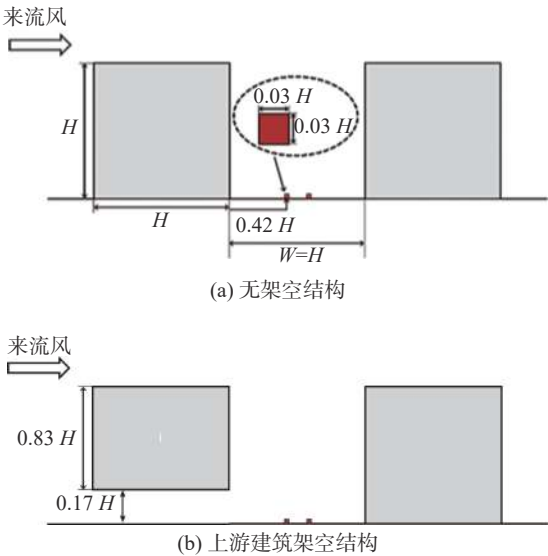


图 1 二维街谷模型

Fig. 1 Two-dimensional street canyon model

式中： U_{ref} 为参考高度 0.48 m 处风速， $U_{\text{ref}} = 7 \text{ m/s}$ ； ν 为流体的运动黏度， $\nu = 1.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

计算得出 $Re = 5.6 \times 10^4$ ，确保了街谷内的气流流动与雷诺数无关^[15]。

1.2 数值模型

1.2.1 控制方程

RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)模型是计算街谷内流场最常用的模型，在 RANS 模型中，标准 $k-\varepsilon$ 模型可以很好地再现完全湍流的一般结构，因此，本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对湍流的二维流动进行求解。控制方程：

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

(2)

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

(3)

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

(4)

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

(5)

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；标准湍流模型中的常数 $\{C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon\} = \{1.44, 1.92, 1.0, 1.3\}$ 。

污染物对流扩散方程：

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

(6)

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，取值范围为 0.2~1.3^[16]，本

文对 Sc_t 最优取值进行验证，得出 $Sc_t = 0.4$ 。

1.2.2 计算域、边界条件与计算方法

图 2 为参考工况计算域示意图，本文参照文献 [17]，计算域的长宽尺寸设为 $27H \times 8H$ ，入口边界距离上游建筑迎风面 $8H$ ，采用速度入口条件 (velocity inlet)，对水平风速、湍动能及耗散率进行设置。出口边界与下游建筑背风面距离为 $16H$ ，采用自由出流条件 (outflow)。上边界距离建筑顶部 $7H$ ，采用对称边界条件 (symmetry)，建筑物壁面以及地面均设置为壁面无滑移、浓度无渗透的壁面边界条件 (wall)。

采用 ANSYS Fluent 14.5 软件进行计算求解，其中，描述流动与污染物扩散的控制方程采用有限体积法 (FVM) 离散，压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法，对流扩散方程采用三阶 QUICK 格式^[17]。各个变量的相对残差设置为 10^{-6} 。

1.3 模型验证与网格独立性分析

1.3.1 风洞实验概况

采用德国 Karlsruhe 大学的风洞实验实测数据^[18]对模型进行验证。验证工况如图 3 所示，与参考工况的街谷布局一致，但在街道内只设置 1 条线源，距离街谷背风面 $0.42H$ 。无量纲浓度 K 定义为

$$K = \frac{CU_{\text{ref}}HL}{Q_e}$$

(7)

式中： C 为污染物的体积分数； L 为线源长度， $L = 1.42 \text{ m}$ ； Q_e 为 SF_6 释放源强。

入口处的水平风速、湍动能及耗散率公式为

$$\frac{u}{U_{\text{ref}}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{\text{ref}} - d_0} \right)^{0.23}$$

(8)

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_u}}$$

(9)

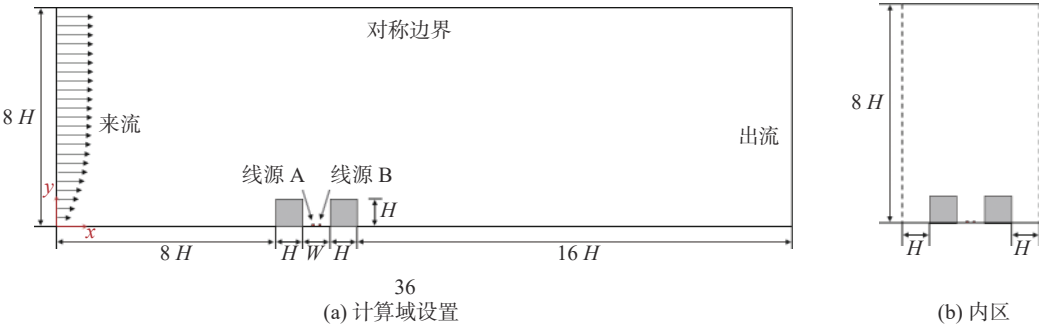


图 2 计算域示意图
Fig.2 Computational domain

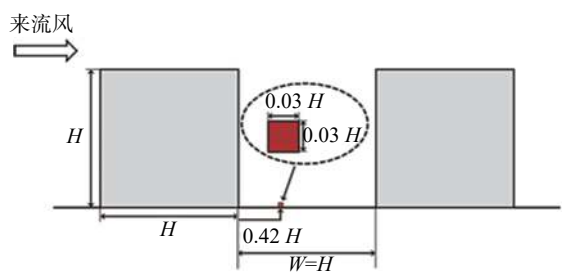


图3 风洞实验二维街谷模型

Fig. 3 Two-dimensional street canyon model of wind-tunnel experiment

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \tag{10}$$

式中： u 为高度为 z 处的风速； z_{ref} 为参考高度， $z_{\text{ref}}=0.48\text{ m}$ ； z 为离地高度； d_0 为位移高度， $d_0=0.002\text{ m}$ ； u_* 为摩擦速度， $u_*=0.385\text{ m/s}$ ； κ 为卡门常数， $\kappa=0.4$ ； C_u 为经验常数， $C_u=0.09$ 。

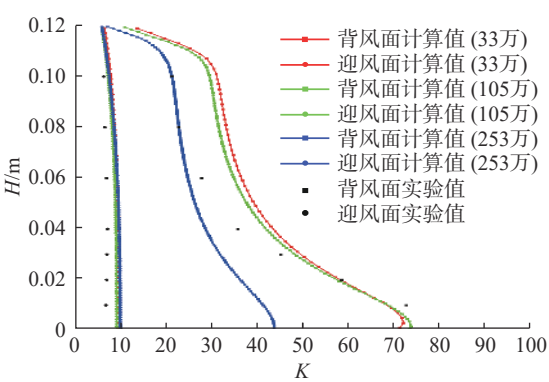
1.3.2 网格敏感性与模型参数验证

验证工况计算区域与参考工况一致，线源处采用三角形网格，网格精度从0.2 mm逐渐增加到1 mm。内区(图2(b))采用1 mm的四边形网格，街谷外部采用增长率为1.01的四边形网格，总网格数约为105万。图4(a)为不同网格精度的街谷背风面和迎风面无量纲浓度的计算值与风洞实验测量值对比图，结果表明，网格数为105万时模拟结果与风洞实验吻合较好。图4(b)为不同 Sc_t 值的街谷背风面和迎风面无量纲浓度的计算值与风洞实验测量值的对比图，可以看出， $Sc_t=0.4$ 时数值模拟与风洞实验结果吻合较好。

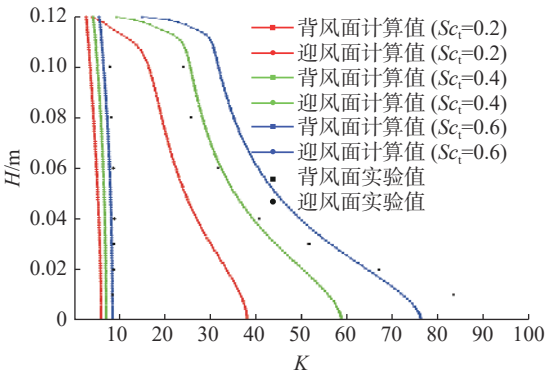
2 结果与讨论

2.1 不同架空结构街谷内流场变化与分析

如图(5)所示，在标准街谷内产生了一个中心略高于街谷中心的顺时针涡，涡心附近气流流速较小，靠近建筑迎风面和地面的气流流速较大。随着 H/W 的增加，涡心上移，主涡变大，街谷底部气流流速明显减弱(图5(a)，6(a)，7(a)，8(a))，当 $H/W=2$ 时，上游建筑屋顶产生明显的顺时针涡(图8(a))。当上游建筑架空时，强气流穿过上游建筑架空通道向下游建筑移动，并沿着街谷迎风向上升，导致流场反向(图5(b)，6(b)，7(b)，8(b))。街谷内原有单顺时针涡被破坏，背风面产生了2个反向涡，同时在街道迎风角形成很小的顺时针涡。随着 H/W 的增加，底部以及迎



(a) 不同网格密度



(b) 不同 Sc_t 数

图4 数值模拟结果与风洞实验数据对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulation results and wind tunnel experiment data

风面气流流速明显增强，当 $H/W=2$ 时，背风面只有一个大的逆时针涡，两侧建筑屋顶均产生明显的顺时针涡，屋顶水平对流作用减弱(图8(b))。当下游建筑底层架空时(图5(c)，6(c)，7(c)，8(c))，街谷内流场分布没有发生变化，气流通过下游建筑架空通道进入街谷，背风面气流流速增强，街谷内气流被切割成迎风面规则的顺时针涡和背风角较小的反向涡。随着 H/W 的增加，架空通道的气流增强，街谷内迎风面的顺时针涡增大、增强，左上侧逆时针涡减小，最终消失。图5(d)为两侧建筑均架空时街谷内的流动结构，大部分气流直接穿过架空通道流出街谷，街谷内形成2个方向相反的涡，气流流速较低。随着 H/W 的增加，如图5(d)，6(d)，7(d)，8(d)所示，街谷下部逆时针主涡逐渐增强、增大，而上方顺时针涡逐渐减小、变弱，当 $H/W=2$ 时，街谷上方的涡消失，迎风面气流在屋顶水平的流动方向发生明显变化，覆盖了街谷上方，导致街谷屋顶水平对流作用减弱(图8(d))。以上分析可知，气流随架空通道进入街谷，对街谷内的流场产生影响，均从

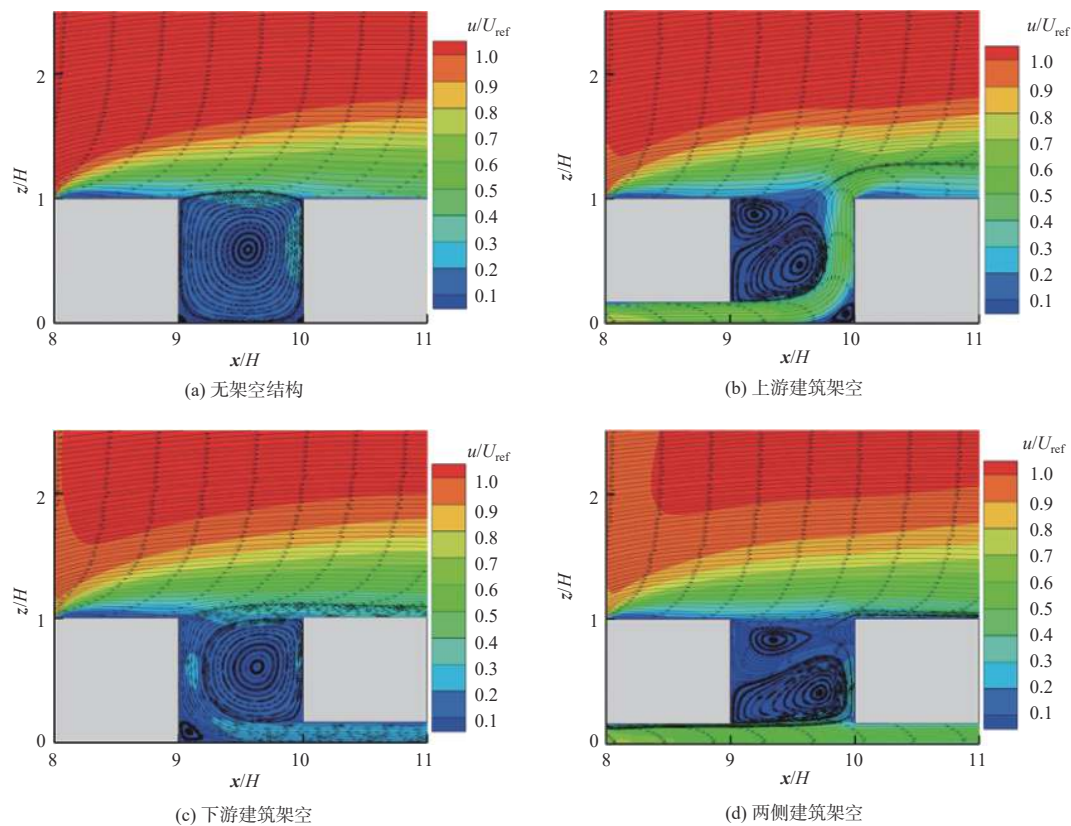


图5 $H/W=1$ 时不同底层架空结构的街谷流场

Fig.5 Flow fields inside street canyons with void decks when $H/W=1$

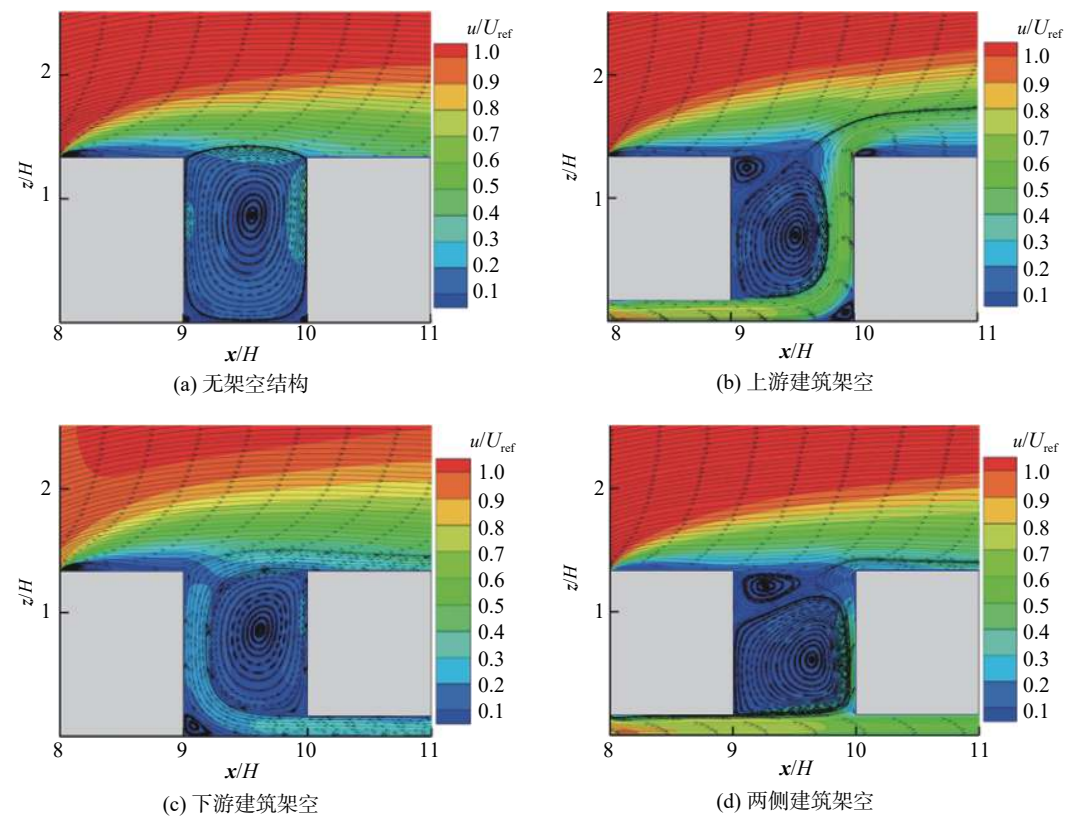


图6 $H/W=4/3$ 时不同底层架空结构的街谷流场

Fig.6 Flow fields inside street canyons with void decks when $H/W=4/3$

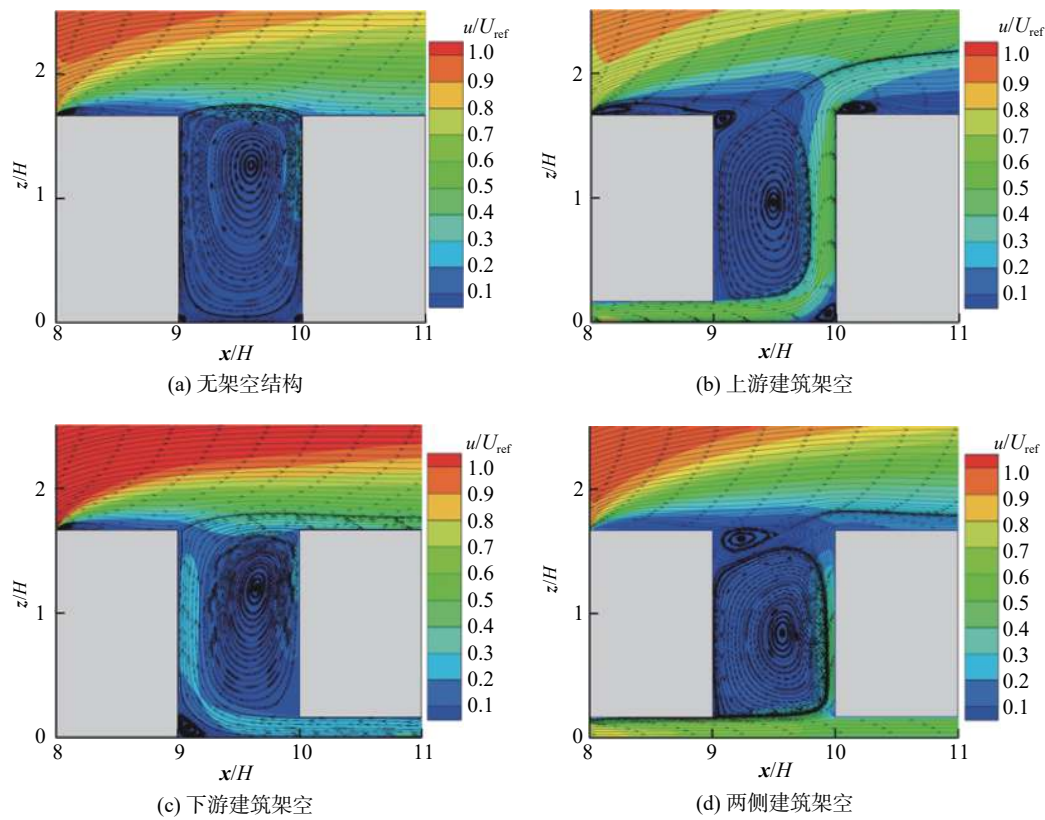


图 7 $H/W=5/3$ 时不同底层架空结构的街谷流场

Fig.7 Flow fields inside street canyons with void decks when $H/W=5/3$

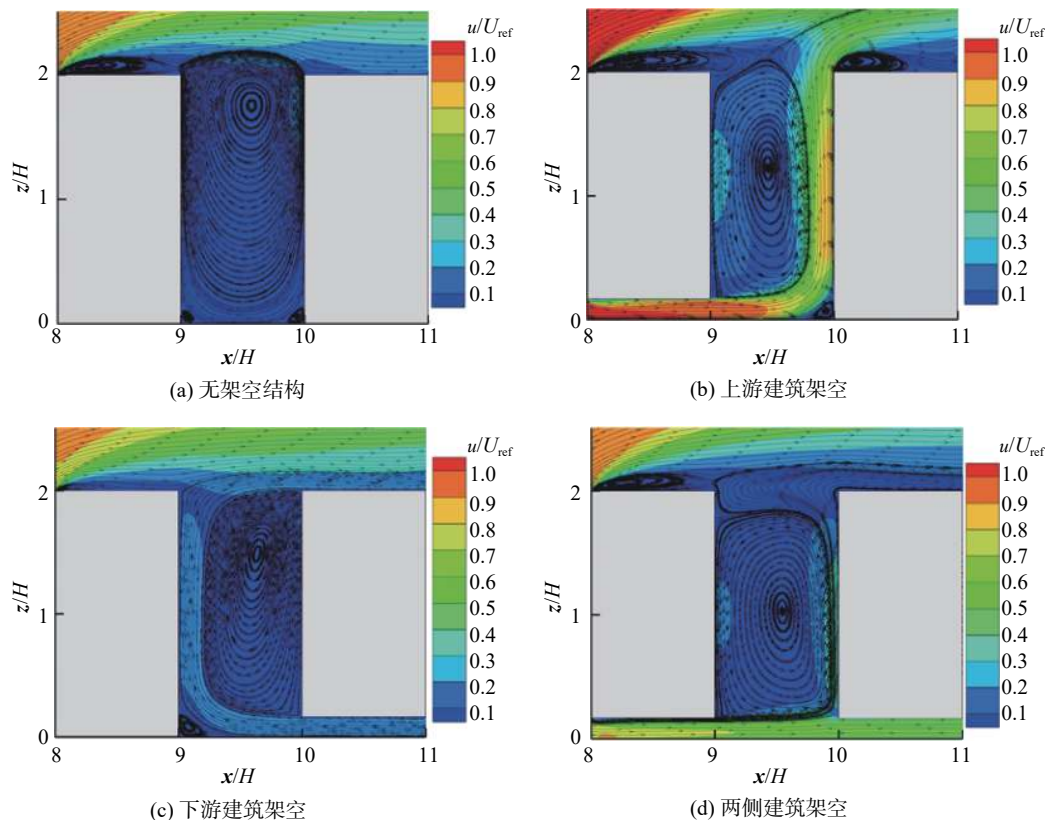


图 8 $H/W=2$ 时不同底层架空结构的街谷流场

Fig.8 Flow fields inside street canyons with void decks when $H/W=2$

不同程度上增强了街谷内的平均通风能力，且随着 H/W 的增加，对街谷内流动结构的影响增大。

2.2 不同架空结构街谷内污染物浓度分布特点及分析

在街道峡谷中，交通污染物的对流扩散及分布主要受街谷内流动结构的影响。在无架空街谷内，污染物在顺时针涡作用下聚集在背风面，又沿背风面向上爬升，部分污染物随峡谷顶部水平气流排出街谷，因此，背风面污染物浓度明显高于迎风面(图 9(a)，10(a)，11(a)，12(a))。随着 H/W 的增加，街谷底部对流作用明显减弱，导致污染物在背风面近地面积累，当 $H/W=2$ 时，整个街谷底部通风能力最弱，污染物积累严重，空气质量最差(图 12(a))。当上游建筑架空时，街谷内流场反向导致污染物随气流移至迎风面，并沿迎风面向上逸出街谷，迎风面附近污染较严重，如图 9(b)，10(b)，11(b)，12(b)所示。由于架空通道致使峡谷内的气流流速(通风能力)随着 H/W 的增加而逐渐增大，因此，更多污染物沿迎风面随气流排出街谷，街谷内污染程度明显改善。当下游建筑架空时，街谷内污染物分布特点与无架空街谷相似(图 9(c)，10(c)，11(c)，

12(c))，但由于架空通道增强了背风面气流，因此，更多污染物随气流沿背风面排出街谷，致使背风面污染程度降低。相较于标准街谷，下游建筑架空结构对迎风面空气质量改善程度随着 H/W 的增加逐渐增强。两侧建筑架空的街谷内的污染物可以直接随着架空通道的强气流逸出街谷(图 9(d)，10(d)，11(d)，12(d))，该架空结构的有效通风能力最强。随着 H/W 的增加，架空街谷上部的流动结构虽然显著改变，但底部有效的强气流结构基本不变，污染物可随气流及时排出街谷，不会对街谷上部造成影响，因此，两侧建筑底部架空结构最有利改善街谷空气质量。

2.3 街谷内平均污染水平评价分析

图 13(a)对比了所有工况街谷内的平均污染物浓度，结果显示，随着 H/W 的增加，街谷内平均污染物浓度逐渐增大。架空结构可降低街谷内平均污染物浓度。与无架空街谷相比，架空结构显著改善了街谷内的空气质量。两侧建筑架空结构比单侧建筑架空更有利于街谷内污染扩散，两侧建筑架空街谷内的污染物浓度降低 91%~98%，而上游建筑架空街谷内的污染物浓度可降低 71%~90%。下游建筑架空结构对街谷内污染物的扩散作

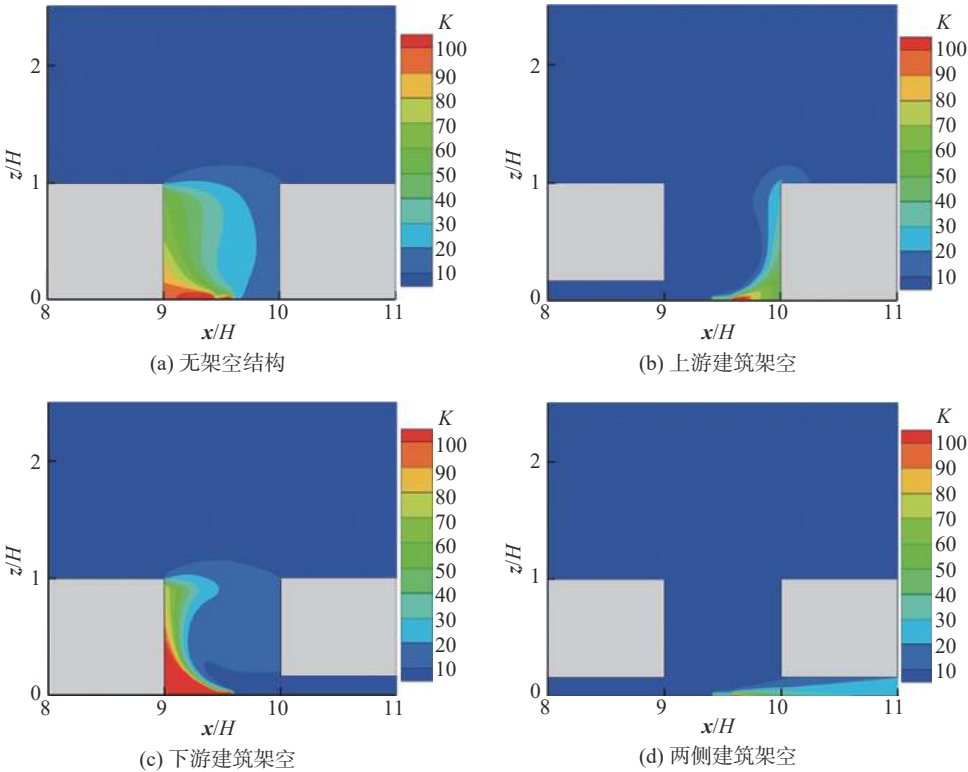


图 9 $H/W=1$ 下不同底层架空结构的街谷内无量纲浓度分布

Fig.9 Dimensionless concentration distributions inside street canyons with void decks when $H/W=1$

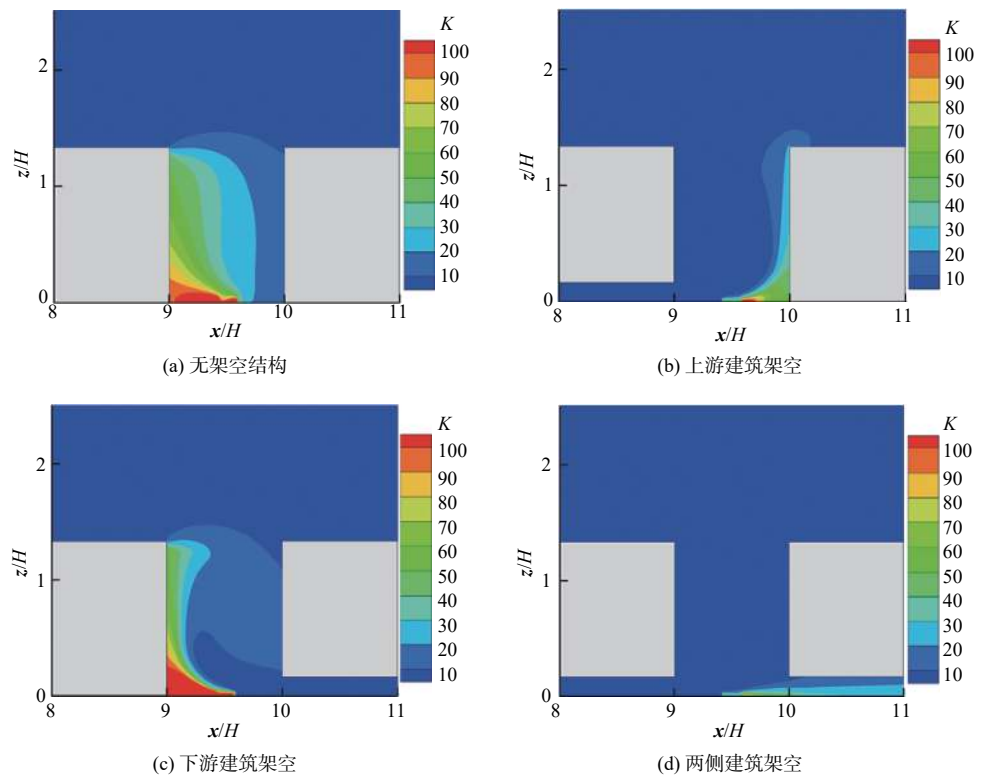


图 10 $H/W = 4/3$ 时不同底层架空结构的街谷内无量纲浓度分布

Fig.10 Dimensionless concentration distributions inside street canyons with void decks when $H/W = 4/3$

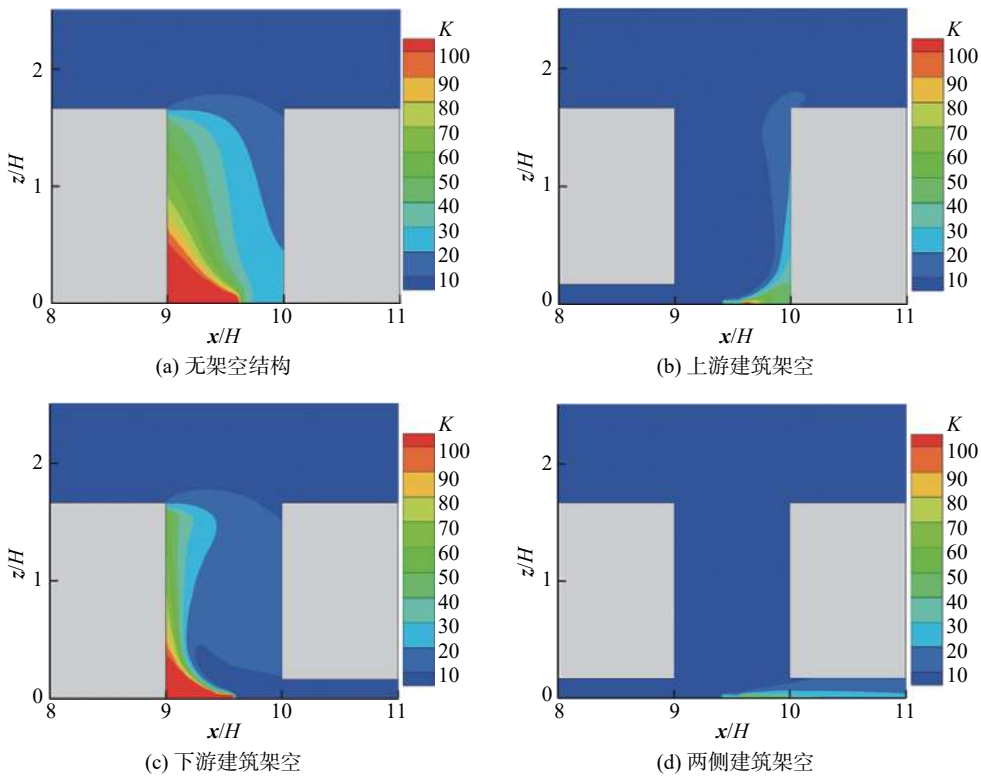


图 11 $H/W = 5/3$ 时不同底层架空结构的街谷内无量纲浓度分布

Fig.11 Dimensionless concentration distributions inside street canyons with void decks when $H/W = 5/3$

用随着 H/W 的增加逐渐增强，当 $H/W = 2$ 时，街谷内平均污染物浓度可降低 69%。

图 13(b)和 13(c)为所有工况背风面和迎风面行人高度处污染物平均浓度柱状图。从图 13(b)可

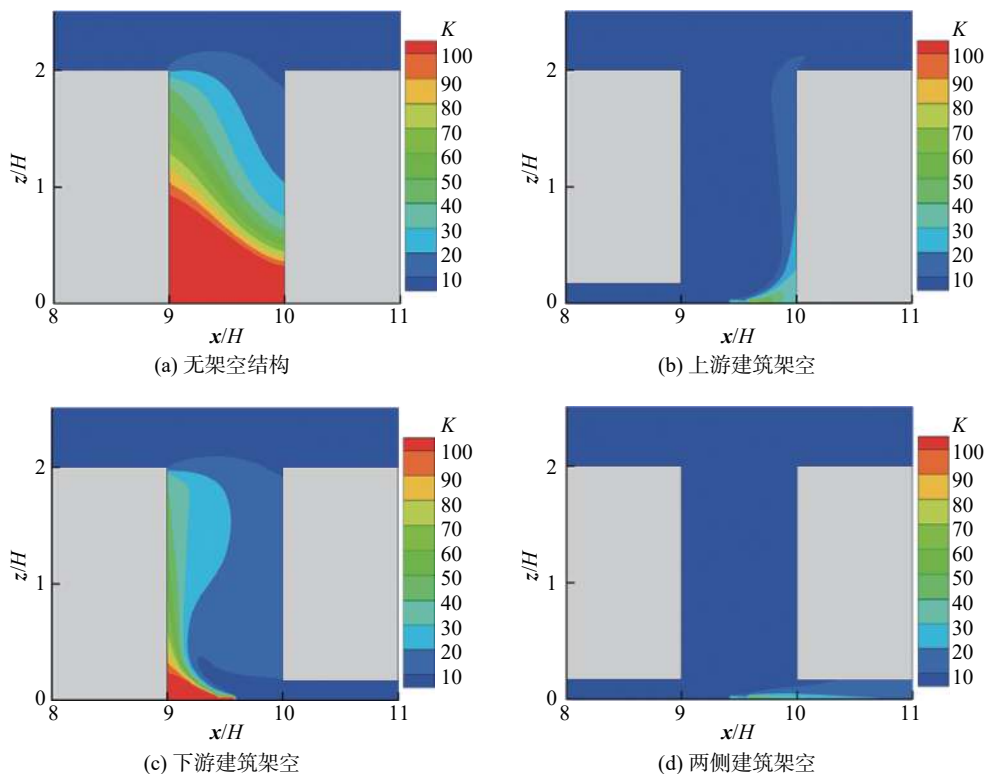


图 12 $H/W=2$ 时不同底层架空结构的街谷内无量纲浓度分布

Fig.12 Dimensionless concentration distributions inside street canyons with void decks when $H/W=2$

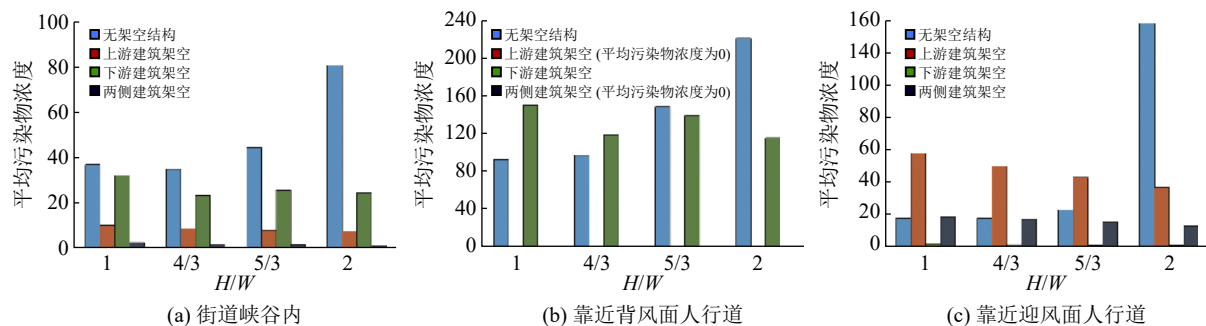


图 13 研究工况街谷内不同位置的平均污染物浓度

Fig.13 Mean concentrations at different locations for all studied cases

以看出，对于无架空街谷，背风面污染物浓度随着 H/W 的增加而不断增大，当 $H/W=2$ 时，街谷内背风面行人高度处污染物平均浓度为 $H/W=1$ 时的 135%。由于上游建筑架空结构和两侧建筑架空结构改变了街谷内的流场方向，背风面行人高度处污染物平均浓度为 0。随着 H/W 的增加，下游建筑架空对街谷背风面行人高度处污染物浓度影响并不显著。

由图 13(c) 可知，在 $H/W=2$ 的无架空街谷中，污染物聚集在街谷下方不易扩散，导致迎风面行人高度处平均浓度显著增加。与标准街谷相比，上游建筑架空结构导致污染物聚集在迎风

面，但是，随着 H/W 的增加，迎风面行人高度处污染物平均浓度逐渐减小。下游建筑架空有利于迎风面行人高度处污染物的扩散，街谷内迎风面行人高度处的污染物平均浓度降低了 85%~99%。两侧建筑架空结构对迎风面行人高度处污染物浓度的影响随 H/W 的增加变化不大。由此可见，从行人健康角度出发，建筑高度增加(H/W 增大)不利于行人高度处污染物的扩散，但是，架空结构可以明显改善行人高度处的空气质量，其中，上游建筑架空和两侧建筑架空最有利于靠近背风面人行道污染物的对流扩散，下游建筑架空最有利于靠近迎风面人行道污染物的扩散。

3 结 论

通过经风洞实验验证的 CFD 数值模型, 研究了 4 种高宽比条件下不同架空结构对街谷内流场和污染物分布的影响, 可以得出以下结论:

a. 架空结构增强了街道峡谷内的平均通风能力, 且随着 H/W 的增加, 对街谷内流动结构的影响逐渐增大。当 $H/W < 2$ 时, 架空建筑街谷内的主涡逐渐变大, 涡心上移, 上方涡变小。当 $H/W = 2$ 时, 架空建筑街谷内流动结构与污染物扩散发生显著变化, 街谷内仅有一个涡, 屋顶上方对流作用减弱。

b. 不同建筑架空结构对街谷两侧污染物分布的影响不同。两侧建筑架空和上游建筑架空显著降低了背风面污染物的浓度, 背风面的污染物平均浓度为 0。下游建筑架空结构有利于迎风面污染物的扩散。

c. 与无架空街谷相比, 架空结构显著改善了街谷内的空气质量。两侧建筑架空结构比单侧建筑架空更有利于街谷内污染扩散, 两侧建筑架空街谷内的污染物浓度降低了 91%~98%。而在单侧建筑架空街谷内, 上游建筑架空街谷内的污染物浓度可降低 71%~90%。下游建筑架空结构对街谷内污染物的扩散作用随着 H/W 的增加逐渐增强, 当 $H/W = 2$ 时, 街谷内平均污染物浓度可降低 69%。

参考文献:

- [1] HUANG Y D, HE W R, KIM C N. Impacts of shape and height of upstream roof on airflow and pollutant dispersion inside an urban street canyon[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(3): 2117–2137.
- [2] LIU Y H, LUO Y P, MIAO S H, et al. Pseudo-simultaneous measurements for the spatial-temporal characteristics of accumulation and coarse mode particles near an urban viaduct within street canyons[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(5): 1643–1654.
- [3] CUI D J, HU G, AI Z T, et al. Particle image velocimetry measurement and CFD simulation of pedestrian level wind environment around U-type street canyon[J]. *Building and Environment*, 2019, 154: 239–251.
- [4] HANG J, LUO Z W, WANG X M, et al. The influence of street layouts and viaduct settings on daily carbon monoxide exposure and intake fraction in idealized urban canyons[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 72–86.
- [5] LI X X, LIU C H, DENNIS Y C, et al. Recent progress in

CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(29): 5640–5658.

- [6] 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.
- [7] 赵丹平, 梁志勇. 城市街道峡谷二维空气流场的数值计算[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2010, 36(1): 109–114.
- [8] AI Z T, MAK C M. CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction: evaluation of three computational settings[J]. *Building and Environment*, 2017, 114: 293–306.
- [9] TSE K T, ZHANG X L, WEERASURIYA A U, et al. Adopting ‘lift-up’ building design to improve the surrounding pedestrian-level wind environment[J]. *Building and Environment*, 2017, 117: 154–165.
- [10] 水滔滔, 刘京, 肖荣波, 等. 底部架空住区风环境风洞试验研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(2): 22–26.
- [11] DU Y X, MAK C M. Effect of lift-up design on pedestrian level wind comfort around isolated building under different wind directions[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 296–301.
- [12] DU Y X, MAK C M, LIU J L, et al. Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configurations under three wind directions[J]. *Building and Environment*, 2017, 117: 84–99.
- [13] 华征, 钱杰, 沈艳杰, 等. 底部架空建筑周围风环境模拟研究[C]//第十四届西南地区暖通空调热能动力学术年会论文集. 贵阳: 制冷与空调编辑部, 2011.
- [14] 卢家国, 刘延雷, 尹世翔. 建筑底层架空式开放空间设计初探[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(35): 3712.
- [15] UEHARA K, WAKAMATSU S, OOKA R. Studies on critical Reynolds number indices for wind-tunnel experiments on flow within urban areas[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107(2): 353–370.
- [16] BRERETON C A, CAMPBELL L J, JOHNSON M R. Influence of turbulent Schmidt number on fugitive emissions source quantification[J]. *Atmospheric Environment: X*, 2020, 7: 100083.
- [17] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 1749–1761.
- [18] KASTNER-KLEIN P, PLATE E J. Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(24/25): 3973–3979.