

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.002

# 高架斜坡及车辆诱导效应对污染物传播与暴露风险研究

俞欣, 刘晓平, 张光伟, 祝健

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章以带有坡度路面高架的城市街谷为研究对象,基于数值模拟技术,选用 CO 作为车辆尾气的典型代表物,采用吸入分数和个人吸入分数评估道路附近居民和行人的 CO 暴露风险,探究高架斜坡和车辆诱导效应对气流组织和污染物扩散的综合影响,并考虑街谷高宽比和车辆在斜坡行驶时排放差异影响。结果表明,街谷内带有坡度高架路面对于污染物扩散及分布有显著影响,高架斜坡两侧较高位置处的最大无量纲质量浓度  $K_c$  值可达到较低位置处的 6 倍以上,对于该类高架周边高层建筑用户产生较大影响。在引入车辆运动效应下,同类场景高架桥面上方的建筑物表面质量浓度显著高出 1~2 个数量级,表明车辆诱导效应不容忽视。街谷高宽比  $H/W$  为 3 时的迎风面质量浓度显著高于其他情况下的质量浓度,质量浓度相差 1~2 个数量级,高宽比越大越不利于污染物的扩散。

**关键词:**高架斜坡;街道峡谷;车辆诱导效应;污染物;吸入分数

**中图分类号:**X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1595-06

## Numerical simulation on the influence of viaduct gradient and vehicle-induced effect on pollutant dispersion and exposure risk

YU Xin, LIU Xiaoping, ZHANG Guangwei, ZHU Jian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Taking the urban street canyon with viaduct gradient as the research object, using numerical simulation technology, and selecting carbon monoxide(CO) as a typical representative of vehicle exhaust, the intake fraction and personal intake fraction were adopted to evaluate the CO exposure risk of pedestrians and nearby residents. The comprehensive influence of viaduct gradient and vehicle-induced effect on airflow and pollutant dispersion was explored. In addition, the effects of aspect ratio of the street canyon and differences in emissions of vehicles on viaduct gradient were taken into account. The results showed that the presence of viaduct gradient in the street canyon hindered the diffusion of pollutants, and the maximum dimensionless concentration( $K_c$ ) at the higher positions on both sides of the viaduct gradient could reach more than six times that at the lower positions. It had a great impact on the residents of high-rise buildings around the viaduct. Vehicle movement resulted in building surface concentrations above the viaduct deck that were 1-2 orders of magnitude higher than those without vehicle movement, showing the influence of vehicle-inducing effect. When the aspect ratio( $H/W$ ) was 3, the concentration on the windward side of the street canyon was significantly higher than that in other cases, and the concentration difference was 1-2 orders of magnitude. The greater the aspect ratio, the more unfavorable the diffusion of pollutants.

**Key words:** viaduct gradient; street canyon; vehicle-induced effect; pollutant; intake fraction

随着中国城市化进程的加快以及机动车辆的增多,城市污染源主要来自于燃烧化石燃料的各

类机动车。根据中国生态环境部发布的 2017—2021 年《中国移动源环境管理年报》<sup>[1]</sup>,一氧化碳

收稿日期:2023-03-29;修回日期:2023-05-31

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0810600)

作者简介:俞欣(1997—),男,浙江宁波人,合肥工业大学硕士生;

刘晓平(1978—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化合物( $\text{NO}_x$ )、颗粒物的排放量分别占机动车 4 项污染物总量的百分比均超 80%。文献[2]计算合肥市机动车尾气排放量及排放特征,小型客车、大型客车是 CO 主要来源,且小型客车对 CO 排放贡献率达 59.5%。总体而言,交通机动车排放造成的尾气污染是城市各类污染的主要问题。

文献[3]在 3D 街道模型中发现街道峡谷的不同高宽比( $H/W$ )对流量和  $\text{CO}_2$  扩散的影响,此外,风速也是影响迎风面和背风面污染扩散的关键因素<sup>[4]</sup>。随着城市高架路面的大量涌现,带有坡度的高架出入段及匝道等对于周边气流及车辆尾气扩散等环境要素的影响不容忽视。高架桥往往包含平面段和带有坡度路面段,已有较多学者针对高架桥平面段对污染物扩散的影响进行研究<sup>[3,5]</sup>;另外,引桥和匝道在城市街谷中大量存在,对机动车尾气扩散有潜在的影响,并可能对道路两侧居民呼吸健康造成影响,目前在这方面的研究较为有限<sup>[6]</sup>。带有坡度路面高架桥通常包括上坡和下坡路段。道路坡度带来两大问题:一是道路坡度引起的车辆排放差异;二是带有坡度路面高架桥对车流量和污染物扩散的阻滞作用。车辆排放在不同的行驶条件下会发生变化,包括行驶速度、道路坡度等,一些学者通过现场试验测量了车辆在道路坡度上的排放。文献[7]发现  $\text{CO}_2$  排放率随着道路坡度的增加而上升;与平坦地形相比,坡度为 4% 时,CO、 $\text{NO}_x$ 、HC 的平均排放率分别增加 10、5、3 倍<sup>[8]</sup>。文献[9]的研究表明车辆排放在隧道的斜坡段不稳定,上坡段的排放量大约是下坡段的 2 倍;文献[10]实测了不同道路工况下汽车尾气的排放特征。斜坡道路的存在不仅

改变了气流模式,也促使更多的机动车尾气排放到街道上,强烈影响气态污染物的扩散过程。

本研究利用数值模拟方法,探讨了高架桥坡度和车辆诱导效应对城市街谷内流场及污染物扩散的影响,同时结合不同街谷高宽比及道路实际排放差异等街谷环境下的常见影响因素进行了综合分析。研究结果可为带有坡度的高架引桥周边空气环境优化提供思路,同时为周边建筑用户的开窗通风及室外活动提供科学支撑。

## 1 计算模型及方法

### 1.1 建筑模型

本研究采用 1:150 的缩尺模型。街谷两侧建筑尺寸(长×宽×高)为 20 m×20 m×100 m,建筑高度与道路宽度之比  $H/W=1$ 。按照《城市道路工程设计规范(CJJ 37—2012)》<sup>[11]</sup>,城区双向四车道尺寸,每条车道为 3.5 m,人行道宽度为 3.0 m,根据主干路设计时速选取车速、坡度及坡长最大值分别为 36 km/h(即 10 m/s)、6%、140 m。高架斜坡的高度、宽度和水平长度分别设置为 9、14、139 m;车辆模型简化为 1 个长方体,长方体的长、宽、高分别为 4.0、1.6、1.4 m。高架斜坡下方采取实体处理,不考虑流场。污染物面源宽度和长度与机动车道相同。根据引言所述,道路上汽车排放的尾气中 CO 的占比最高,且 CO 密度与空气相近,其扩散过程不因密度产生影响,故选取 CO 为汽车尾气污染源。污染源排放方式为面源恒定释放,单个污染源体积流量  $c$  为  $2 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ 。建筑物参考高度处风速为 2 m/s。不同条件下 8 个算例参数的详细设置见表 1 所列。

表 1 算例设置

算例编号	道路形式	$\alpha/\%$	$H/W$	参考高度处风速/(m/s)	$c_L/(10^{-9} \text{ m}^3/\text{s})$	$c_R/(10^{-9} \text{ m}^3/\text{s})$	机动车速度/(m/s)
Case I	地面道路	0	1	2	2	2	0
Case II	高架斜坡	6	1	2	2	2	0
Case III	高架斜坡	6	1	2	2	2	10
			2	2	2	10	
			3				
Case IV	高架斜坡	6	1				
			2	2	2	4	10
			3				

### 1.2 边界条件

计算域尺寸( $X \times Y \times Z$ )为  $15H \times 15H \times 6H$  ( $H$  为缩尺模型建筑高度)<sup>[12]</sup>。入口距离上游建筑

$3H$ ,出口距离下游  $12H$ 。计算域高度距离地面为  $6H$ ,域两侧距离街谷  $5H$ 。计算域进口处采用自由流动速度,计算域出口采用零法向梯度。建筑表

面、道路和地面设置为无滑移壁面,将计算域的两侧设置为对称边界。本文的来流风剖面采用对数律,通过用户自定义函数定义速度入口的对数速度  $U_z$ 、湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  如下:

$$U_z = (u/\kappa)\ln[(z+z_0)/z_0] \quad (1)$$

$$k = u^2 / \sqrt{C_\mu} \quad (2)$$

$$\epsilon = u^3 / [\kappa(z+z_0)] \quad (3)$$

其中: $u$  为摩擦速度,0.251 4 m/s; $\kappa$  为 von Karman 常数, $\kappa=0.42$ ;  $z_0$  为比例模型中的粗糙高度, $z_0=0.004 4$  m; $z$  为距离地面某一高度; $C_\mu=0.09$ 。

### 1.3 数学模型及验证

本文选取文献[13]风洞试验中双车道试验进行数值模拟验证。试验所用风洞全长为 10.5 m,截面尺寸为 2 m×1 m。建筑物模型的尺寸(长×宽×高)为 600 mm×120 mm×120 mm,道路宽度为 120 mm,对称街谷高宽比  $H/W=1$ 。风洞模型的尺寸与实际街谷的比例是 1:150。选取的采样线  $X=0.292H$  和  $X=0.708H$  如图 1 所示,计算域如图 2 所示。数值模拟验证结果如图 3 所示。由图 3 可知,3 种湍流模型提供了可接受的预测结果。与风洞数据相比,3 种湍流模型中,realizable  $k-\epsilon$  湍流模型优于 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和 SST  $k-\epsilon$  湍流模型,在预测边界层流动、自由流和有旋均匀剪切流方面更准确。因此,选用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模型进行研究。

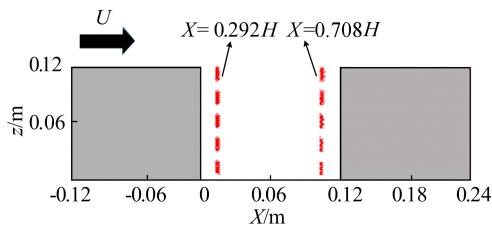


图 1 采样线位置

本文数值模拟都是采用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模型进行计算的,其考虑了湍流剪切应力,根据文献[14]的研究其在研究涡流问题有着更高的精确性。采用加强壁面函数, $y^+$  在大多数壁面上小于 5。半隐式压力关联方程一致算法用于求解速度场和压力场。当  $x, y, z$  方向上的动量、湍动能  $k$ 、湍流耗散率  $\epsilon$  的缩放残差达到  $10^{-4}$  并且对于组分、能量方程缩放残差达到  $10^{-7}$  时,假设获得收敛。组分输运方程是基于气态污染物在大气中运动的动力学原理。采用动态网格法研究车辆运动

效应,解决了移动车辆周围网格变形的问题。

考虑到车辆运动和网格变形的复杂性,选择分层方法对车辆边界附近的网格更新进行处理。由于结构化网格适用于机动车运动和网格更新,因此在计算域的下部区域采用结构化网格。

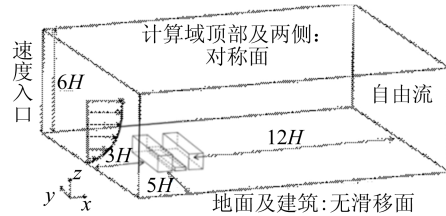
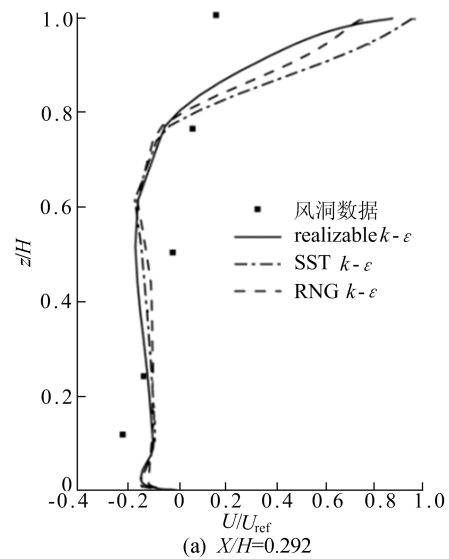
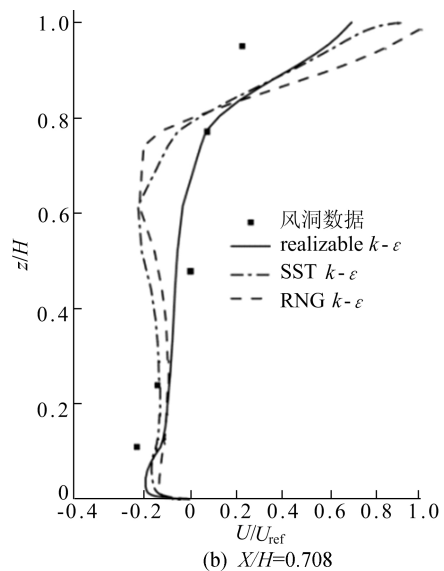


图 2 计算域



(a)  $X/H=0.292$



(b)  $X/H=0.708$

图 3 不同湍流模型模拟结果比较

### 1.4 质量浓度计算及暴露评估方法

#### 1.4.1 质量浓度计算

本文中街谷两侧建筑迎风面和背风面以及人

行人高度处污染物质量浓度的高低以无量纲质量浓度  $K_c$  表示,计算公式为:

$$K_c = z_{ref} U_{ref} C_L / q \quad (4)$$

其中: $K_c$  为无量纲质量浓度; $C$  为街谷两侧建筑近壁面迎风面和背风面  $z/H$  高度处及行人高度处( $z=1.5\text{ m}$ )污染物的线平均质量浓度; $z_{ref}$  为参考高度,文中指对应建筑高度; $U_{ref}$  为参考高度处风速; $L$  为面源长度; $q$  为污染源泄漏的体积流量。

### 1.4.2 暴露评估方法

引用吸入分数  $I_F$  和个人吸入分数  $I_{FP}$  量化污染物强度对街谷两侧建筑内居民暴露风险的影响<sup>[3,15]</sup>,计算公式为:

$$I_F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_i B_{i,j} \Delta t_{i,j} \rho_{ej} / E \quad (5)$$

$$I_{FP} = I_F / \sum_{j=1}^M P_i \quad (6)$$

其中: $N$  为人口群体数量,包括儿童、成人和老年人, $N=3$ ; $M$  为微环境数,包括室内和车辆内或附近, $M=2$ ; $P_i$  为第  $i$  组人群中暴露的总人数; $B_{i,j}$  为平均容积呼吸速率; $\Delta t_{i,j}$  为微环境  $j$  中的时间; $\rho_{ej}$  为微环境  $j$  污染物质量浓度; $E$  为所考虑的时间段内的总排放量。

不同年龄组的种群和平均体积呼吸率采用文献<sup>[16]</sup>中提供的数据。不同年龄组对应不同微环境花费的时间根据文献<sup>[17]</sup>给出的数据。为了简化  $I_F$  和  $I_{FP}$  的计算,本研究假设路边建筑物的每一层中都有 80 人。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高架斜坡与车辆运动对污染物扩散影响

为了定量评估有无高架斜坡和存在水平高架对街谷内迎风侧和背风侧污染物质量浓度的影响,无量纲质量浓度  $K_c$  取迎风侧或背风侧建筑表面水平方向  $z/H$  处线平均质量浓度。有无高架斜坡的街谷内建筑迎风面和背风面的无量纲质量浓度  $K_c$  变化曲线如图 4 所示。

由图 4a 可知,有高架斜坡街谷内背风侧污染物质量浓度显著高于其他情况,最大值比无高架斜坡迎风侧时高 7 倍。由于高架斜坡对街谷底部的污染物扩散存在抑制作用以及街谷内顺时针涡旋,使得污染物积聚在高架斜坡背风风侧。比较车辆运动及静止时,车辆运动导致污染物源上方的建筑物表面质量浓度高于无车辆运动 1~2 个数量级(图 4b)。

沿高架斜坡街谷内  $K_c$  变化曲线如图 5 所示。

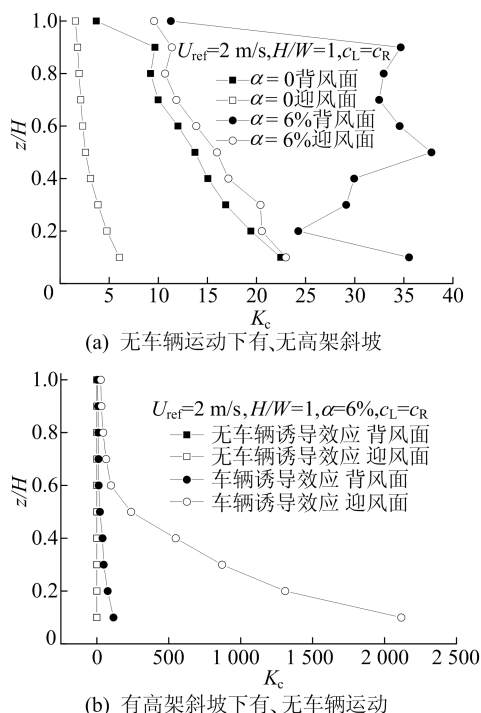
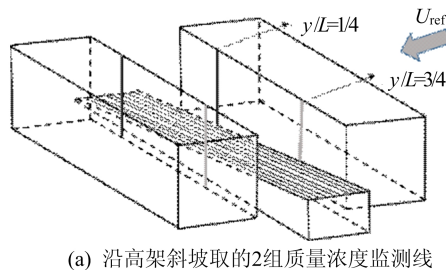


图 4 有无高架斜坡及有无车辆诱导效应下  $K_c$  变化曲线



(a) 沿高架斜坡取的2组质量浓度监测线

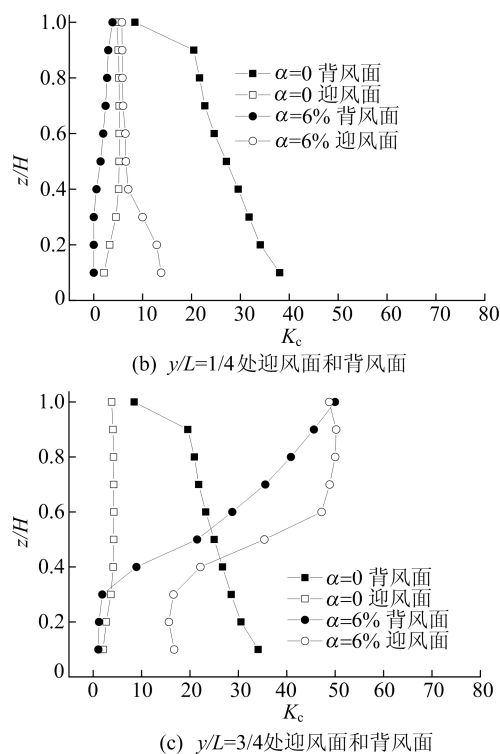


图 5 沿高架斜坡街谷内  $K_c$  变化曲线

在图 5a 中,沿着高架斜坡长度选取的 4 条垂直线分别位于迎风面和背风面建筑表面。4 条线分为 3 组,沿着高架斜坡的位置分别为  $1/4 L$ 、 $3/4 L$ 。由图 5b、图 5c 可知,沿着高架斜坡,随着道路抬升程度加深,污染物质量浓度逐渐升高,街谷上方质量浓度高于街谷底部质量浓度,这是由于高架斜坡对污染源的抬升作用。在处于  $3/4 L$  的位置,  $z/H > 0.5$  时,有高架斜坡的街谷内质量浓度显著高于其他情况。另外,高架斜坡两侧较高位置处的最大  $K_c$  值可达到较低位置处的 5 倍以上,并且随着道路抬升程度加深,迎风侧质量浓度逐渐高于背风侧质量浓度。

## 2.2 街谷高宽比对污染物扩散影响

存在高架斜坡时,不同街谷高宽比下两侧建筑物附近污染物无量纲质量浓度  $K_c$  随建筑高度的变化曲线如图 6 所示。

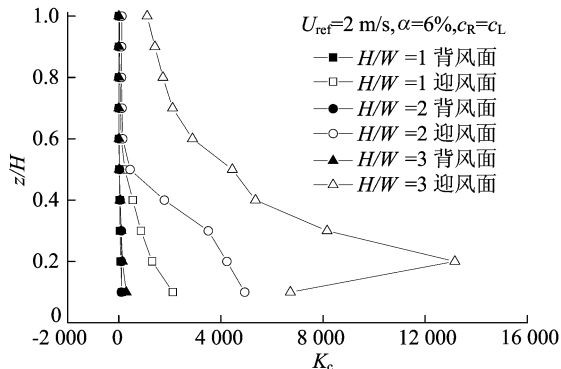


图 6 不同街谷高宽比下  $K_c$  变化曲线

从图 6 可以看出,3 种街谷高宽比 ( $H/W$ ) 的迎风面平均质量浓度显著高于背风面质量浓度。且迎风面与背风面总体质量浓度分别随着街谷高宽比的升高而升高。在街谷上方建筑表面处  $H/W=3$  时的迎风面质量浓度显著高于其他情况下的质量浓度,质量浓度相差 1~2 个数量级。

## 2.3 实际排放差异对污染物扩散影响

### 2.3.1 线源设置方案

道路采用双向四车道,右侧两车道为上坡,左侧两车道为下坡,分为 2 种线源质量浓度:第 1 种是无排放差异,即左右车道质量浓度均相同;第 2 种按实际情况为右侧车道的机动车排放量为左侧的 2 倍。研究实际排放差异对街谷内机动车排放的气相污染物扩散的影响。数值模拟中的建筑几何结构、计算域、边界条件等参照 1.1 节和 1.2 节。

### 2.3.2 建筑物近壁面无量纲质量浓度分析

实际排放差异下  $K_c$  变化曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,实际排放差异对污染物质量浓

度扩散有显著影响,存在实际排放差异的迎风侧  $K_c$  低于无实际排放差异的。相反,背风面  $K_c$  与迎风面相反,  $K_c$  随着高宽比的增加而增加。由图 4 可知,  $H/W=1$  时,2 种情况的迎风面和背风面  $K_c$  均小于 2 000。在较深的街谷 ( $H/W=3$ ),  $K_c$  远高于较浅的街谷,约为 13 000。由于实际排放差异,存在实际排放差异的背风面  $K_c$  高于无实际排放差异的。虽然在车辆上坡侧的线源质量浓度较高,但受车辆运动诱导效应引起的涡旋影响,污染物转移到背风面,使得背风面质量浓度较高。

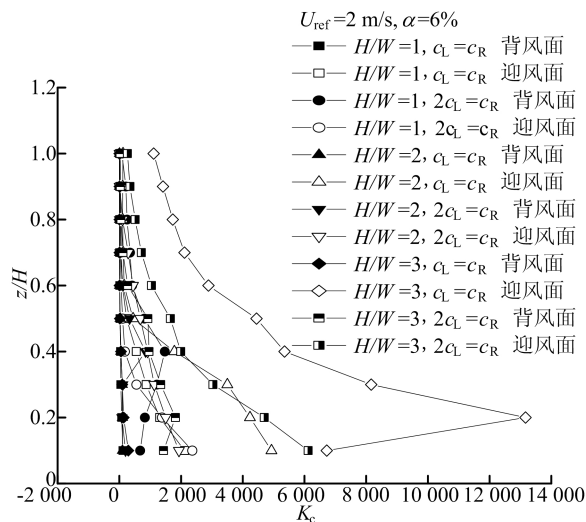


图 7 实际排放差异下  $K_c$  变化曲线

## 2.4 街谷交通环境与居民吸入分数的关系

吸入分数  $I_F$  和个人吸入分数  $I_{FP}$  见表 2 所列。对于有无高架斜坡的情况,在 Case I 和 Case II 中,背风面  $I_F$  从  $6.7 \times 10^{-6}$  增加到  $13.3 \times 10^{-6}$ ,在迎风面从 1.6 增加到  $7.6 \times 10^{-6}$ ,分别增加 2 倍和 5 倍。此外,对于有无车辆诱导效应情况,在 Case II 和 Case III 中,背风面  $I_F$  从  $13.3 \times 10^{-6}$  大幅增加到  $35.6 \times 10^{-6}$ ,迎风面从  $7.6 \times 10^{-6}$  增加到  $286.2 \times 10^{-6}$ ,分别增加 2.7 倍和 40 倍。对于 Case III,背风面  $I_F$  值远低于迎风面。随着  $H/W$  增加,特别是当  $H/W=3$  时,  $I_{F\text{迎风}}/I_{F\text{背风}} = 39.2$ 。与 Case III 和 Case IV 相比,Case IV 的背风面  $I_F$  值是 Case III 的近 10 倍,而 Case IV 的迎风面  $I_F$  值明显低于 Case III,尤其是  $H/W=2$  和  $H/W=3$ 。从变化趋势来看,  $I_{FP}$  与  $I_F$  基本相同,不同的是  $I_{FP}$  反映个人吸入污染物的量,特别针对室内环境,3 类群体在室内的活动时间占比均超过 85%,甚至儿童群体超 90%<sup>[17]</sup>。而老人与儿童的基础身体素质较为薄弱,易受有毒有害污染物的影响。当处于交通环境复杂,即含有

高架斜坡、车辆运动等相关因素时,街谷内的机动车尾气易扩散至室内,对老人与儿童造成健康影响,造成明显的环境污染危害。

表 2 吸入分数和个人吸入分数

算例编号	$I_F/10^{-6}$		$I_{FP}/10^{-6}$	
	迎风面	背风面	迎风面	背风面
Case I	1.6	6.7	0.01	0.01
Case II	7.6	13.3	0.03	0.02
Case III	286.2	35.6	0.07	0.60
	646.8	44.9	0.04	0.62
	2 466.4	68.5	0.04	1.54
Case IV	155.9	300.6	0.63	0.32
	349.2	88.7	0.09	0.33
	1 686.6	750.2	0.47	1.05

### 3 结 论

1) 有高架斜坡街谷内背风侧污染物质量浓度显著高于其他情况,最大值比无高架斜坡迎风侧时高 7 倍。高架斜坡两侧较高位置处的最大  $K_c$  值可达到较低位置处的 5 倍以上。引入车辆诱导效应,污染源上方的建筑物表面质量浓度高于无车辆运动 1~2 个数量级。

2)  $H/W=3$  时的迎风面质量浓度显著高于其他情况下的质量浓度,差异可达 1~2 个数量级,在坡度高架路面存在下,街谷高宽比越大越不利于污染物的扩散。在同一街谷高宽比情况下,考虑车辆排放差异的背风面质量浓度明显高于无实际排放差异的,但总体仍呈现迎风面污染物质量浓度大于背风面污染物质量浓度。

3) 存在高架斜坡和车辆诱导效应情况使得街谷内  $I_F$  和  $I_{FP}$  增加近 40 倍,深街谷( $H/W=3$ )和考虑车辆排放差异分别使得建筑迎风面和背风面近壁面  $I_F$  和  $I_{FP}$  达到最大,进一步加深街谷内的污染程度。

### [参 考 文 献]

[1] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 [EB/OL]. [2023-01-16]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/>.

[2] 王章明,汪家权,胡淑恒. 合肥市机动车尾气排放特征及分担率的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 539-544.

[3] HANG J, LUO Z, WANG X, 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.

[4] 刘改玲,陈晓萌,钟珂. 背景风速对上游有阻挡建筑的街谷

环境的影响[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(6): 39-43.

[5] DING S, HUANG Y, CUI P Y, et al. Impact of viaduct on flow reversion and pollutant dispersion in 2D urban street canyon with different roof shapes-numerical simulation and wind tunnel experiment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 976-991.

[6] CAI M, HUANG Y, WANG Z. Dynamic three-dimensional distribution of traffic pollutant at urban viaduct with the governance strategy[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(8): 1418-1428.

[7] ENNS P, GERMAN J, MARKEY J. EPA's survey of in-use driving patterns; implications for mobile source emission inventories; PB-94-118502/XAB[R]. Ann Arbor: Environmental Protection Agency-Office of Mobile Sources, 1993.

[8] ST DENIS M J, CICERO-FERNANDEZ P, WINER A M, et al. Effects of in-use driving conditions and vehicle/engine operating parameters on "Off-Cycle" events; comparison with federal test procedure conditions[J]. Air & Waste, 1994, 44(1): 31-38.

[9] KEAN A J, HARLEY R A, KENDALL G R. Effects of vehicle speed and engine load on motor vehicle emissions[J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(17): 3739-3746.

[10] 卢云鹤,孙龙林,黄文伟,等. 城市道路工况下汽车排放特征的影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(10): 42-45, 51.

[11] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 1-107.

[12] RAMPONI R, BLOCKEN B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations; validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104: 408-418.

[13] KASTNER-KLEIN P, BERKOWICE R, PLATE J. Modeling of vehicle-induced turbulence in air pollution studies for streets[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2000, 14(1/2/3/4/5/6): 496-507.

[14] TOMINAGA Y, STATHOPOULOS T. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building; comparison of various types of  $k-\epsilon$  models[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(20): 3200-3210.

[15] BENNETT D H, MCKONE T E, EVANS J S, et al. Defining intake fraction[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(9): 1-18.

[16] LUO Z, LI Y, NAZAROFF W W. Intake fraction of nonreactive motor vehicle exhaust in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(15): 1913-1918.

[17] CHAU C K, TU E Y, CHAND W T, et al. Estimating the total exposure to air pollutants for different population age groups in Hong Kong[J]. Environment International, 2002, 27(8): 617-630.

(责任编辑 吴亮)