

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201801063



城市高架桥街谷空气环境和 污染物扩散的数值模拟

秦成君¹, 宋翀芳¹, 王世杰¹, 赵敬源²

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;
2. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 采用 Fluent 6.3 数值模拟, 研究含高架桥的十字路口在不同风向条件下, 街谷内空气流场和污染物浓度场特征. 模拟结果表明: 当来流风向平行于高架桥主干道方向时, 来流在高架桥上引桥下方收缩形成低风速涡旋, 造成高浓度 CO 淤积, 随着高架桥水平路段的延伸, 高架桥下方 CO 浓度逐渐降低, 而高架桥上方行人呼吸高度处 CO 始终保持极高浓度; 当来流风向垂直于高架桥主干道方向时, 高架桥改变了污染物的爬墙效应, 其下方主干道迎风面和背风面 CO 不易扩散, 保持较高浓度; 行人应避免长期在高架桥下方、街谷背风面及十字路口拐角处停留, 以减轻街谷内污染物对人体造成的伤害; 十字路口处引入高架桥会改变污染源的位置、强度, 改变来流风的流动特性, 从而影响街谷中污染物的扩散.

关键词: 城市街谷; 高架桥; 十字路口; 污染物流场; 空气流场

中图分类号: X 511

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)05-0714-06

Numerical Simulation of Air Environment and Pollutant Diffusion in Urban Viaduct Street Canyon

QIN Chengjun¹, SONG Chongfang¹, WANG Shijie¹, ZHAO Jingyuan²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. College of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The characteristics of air flow field and pollutant concentration field in the street canyon were studied under different wind directions in the viaduct crossroads using Fluent 6.3 numerical simulation. The simulation results show that when the direction of the incoming flow was parallel to the main street direction of the viaduct, the incoming flow shrank downwards and formed a low-velocity vortex, causing high concentration of CO deposition. With the extension of the viaduct horizontal section, the CO concentration gradually decreased, while CO at the upper pedestrian respiration level always maintained a very high concentration. When the incoming wind direction was perpendicular to the main street direction of the viaduct, the viaduct changed the climber-climbing effect of the pollutants, and the CO below the main windward and leeward was not easy to diffuse, to maintain a high concentration. Pedestrians should avoid long-term stay under the viaduct, the street leeward and the corner of the intersection stop to reduce the human body damage caused by the pollutants in the street canyon. The viaduct at the crossroads would change the flow characteristics of the flowing winds and the location and intensity of the pollution sources, thus affecting the proliferation of the pollutants in the street canyon.

收稿日期: 2018-01-22

通信作者: 宋翀芳(1974-), 女, 副教授, 博士, 主要从事大气颗粒物扩散及防治的研究. E-mail: 424384295@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678058)

Keywords: urban street canyon; viaduct; crossroads; pollutant concentration field; air flow field

近年来,机动车数量应势增长,导致城市建筑群内机动车污染物排放不断增多,也造成了严重的交通拥堵^[1-2].为缓解过度集中的车辆密度带来的交通压力,我国大部分城市在主干道修建高架桥.众多高架桥街道峡谷道路的相继涌现^[3],造成街道内各种污染物的高度聚集^[4-6].因此,众多学者对高架桥街谷内污染物的扩散规律进行了研究^[7-19].目前,对高架桥街谷的研究主要集中在来流风向垂直于高架桥方向时的简单二维街谷模型方面,忽略了城市街谷十字路口处聚集的高密度怠速车辆的高浓度污染物排放,以及不同风向下高架桥桥面及上下引桥部分对来流风的阻挡作用.含高架桥的十字路口因其复杂的街谷内部结构影响和怠速车辆污染物排放量的增多,可能导致局部地区通风效果较差,使高浓度的汽车尾气污染物不易扩散,产生淤积,对等待通过路口的行人身体健康造成伤害^[20].基于此,本文采用 Fluent 6.3 数值模拟,研究含高架桥的十字路口在不同风向条件下,街谷内空气流场和污染物浓度场特征.

1 数值模型

1.1 模型介绍

以太原市某典型城市高架路交叉街谷——南中环街与新晋祠路交叉口为研究对象,模型示意图如图 1 所示.十字路口周边各建筑物高 40 m,宽 20 m.平行于高架桥方向的南中环街街道为主干道,宽度为 40 m.在高架桥下方地面左右两侧各有 6.6 m 宽度的双车道,紧邻建筑则有 3.4 m 人行道.设高架桥平行于 Y 轴方向,上引桥和下引桥各长 50 m,平行于地面的高架桥距地面 5 m,桥体高 1 m,宽 20 m.新晋祠路为辅路,设其平行于 X 轴方向,其街面宽 20 m,机动车路面部分宽 13.2 m,邻近建筑有 3.4 m 人行道.

考虑到 CO 性质稳定,选取 CO 作为尾气的重要指标.高架桥下方主干道车辆处于转弯怠速状态,排放因子为 $647 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$,车辆密度为 $0.2 \text{ 辆} \cdot \text{m}^{-1}$,假设其车流量为均匀分布的,设为面源入口 1,经计算 CO 排放源强 Q_1 为 $12 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$.平行于 X 轴方向的辅路机动车路面和高架桥桥面上的机动车为正常行驶状态,CO 排放因子为 $61.6 \text{ g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$,车辆密度为 $0.05 \text{ 辆} \cdot \text{m}^{-1}$,车速为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,假设车流量均匀分布,设为面源入口 2,CO 排放源强 Q_2 为 $8 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$ ^[12].来流风速入口设置为速度入口,风速为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,满足指数分布规律,出口设置为压力出口,两侧和顶部皆设置为对称边界,其余面设为墙体.

1.2 数值方程

在街道峡谷内的数值计算中,采用 Fluent 6.3 作为基本程序,将来流空气按不可压缩流动处理,认为流动是稳态绝热的,忽略街谷的热力效应.控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、标准 $k-\epsilon$ 方程和组分运输方程.采用有限容积法离散控制方程,控制方程的离散采用二阶迎风格式^[21-24],计算精度为 0.000 01.对污染物浓度进行无量纲化处理^[18],其计算公式为 $C^* = (C \cdot U \cdot H) / Q$.式中: C 为街谷中任意点位污染物浓度; U 为来流风速; H 为建筑高度; Q 为污染物源强.

2 结果分析

2.1 来流风向平行于高架桥方向

2.1.1 流场分布 来流风向平行于高架桥的十字路口街道内流线分布,如图 2 所示.图 2(a)为 $X=50 \text{ m}$ 截面,辅路处是高宽比为 2:1 的孤立街谷.由图 2(a)可知:受上游阻挡建筑的影响,来流风在上游建筑上端产生上跃激流,在街谷内左上部形成一个顺时针的涡旋,街谷下部涡旋消失,气流沿迎风向向下,在街谷中水平向左,而又竖直向下.图 2(b)为 $X=70 \text{ m}$ 截面,辅路处是高宽比为 2:1 的非孤立街谷.由图 2(b)可知:来流风在街谷上方平滑掠过,靠近背风面自街谷底部出现上升气流,在街谷内部形成左上方和右下方两个顺时针的涡旋.由图 2(c)可知:流场流线先在高架桥上引桥下方处收缩,经过稳定性发展后,在高架桥中后方再次扩张,在下引桥下方分开,十字路口辅路处产生较弱的水平涡旋.由图 2(d)

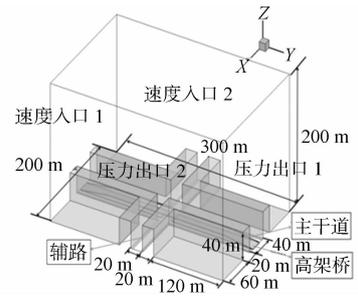


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram

可知:在高架桥上引桥上方,流场分布极为均匀,在十字路口辅路处同样产生明显的水平涡旋。

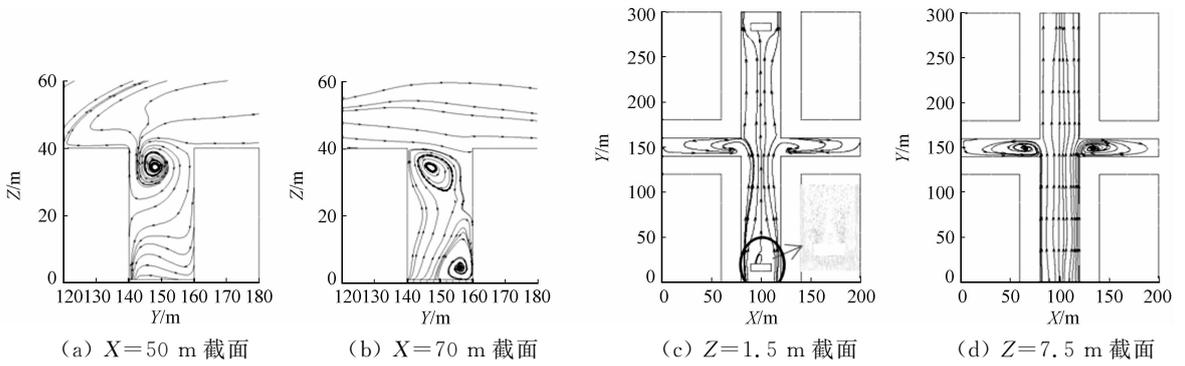


图2 流场特性分布图1

Fig. 2 Distribution diagram of flow field characteristics 1

2.1.2 污染物分布 风向平行于高架桥方向的CO无量纲浓度分布情况,如图3所示。由图3可知:当风向平行于高架桥方向时,存在高架桥的十字路口对CO无量纲浓度分布影响显著,其原因是高架桥的结构和十字路口共同影响了街谷内部涡旋结构及涡旋方向。

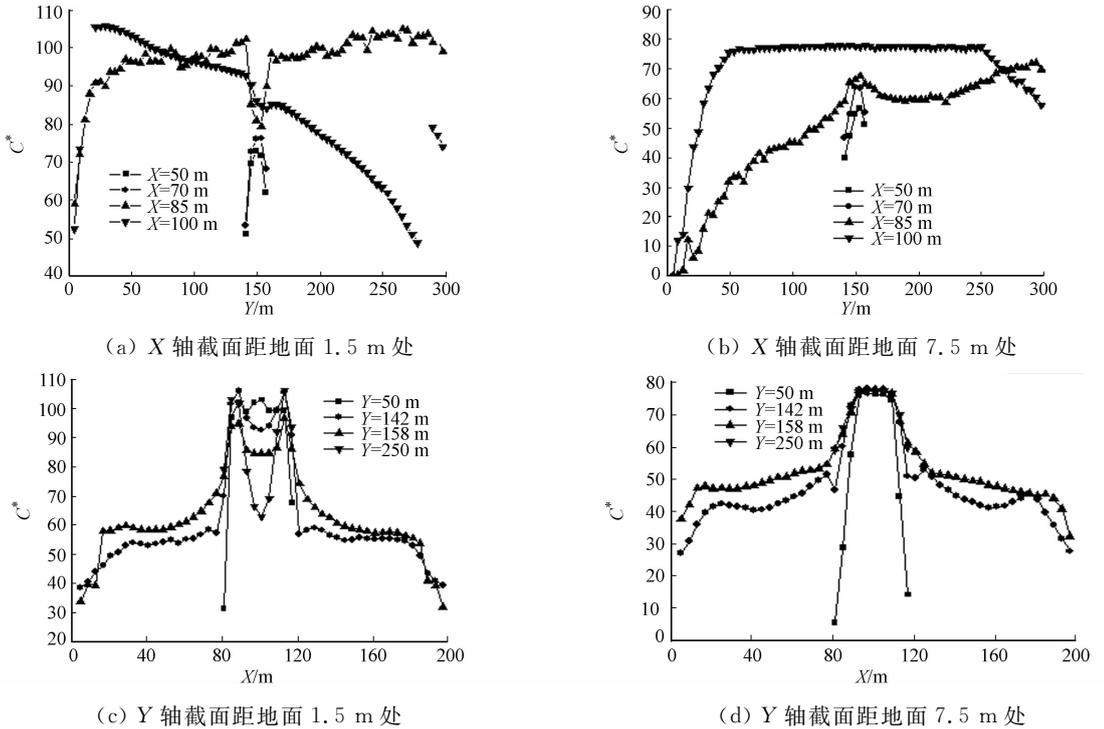


图3 风向平行于高架桥方向的CO无量纲浓度分布

Fig. 3 Dimensionless CO concentration distribution parallel to the viaduct

图3(a)为靠近地面1.5 m,平行于主路方向Y轴的CO无量纲浓度分布。由图3(a)可知:靠近十字路口的 $X=70$ m辅路处CO分布稍高于 $X=50$ m处。这是由于十字路口处的水平涡旋将主路地面道路的污染物带入辅路段; $X=85$ m处为主路高架桥侧下方行车道路的CO分布,在靠近上引桥附近,其CO无量纲浓度迅速爬升,在十字路口处则有明显下降,说明十字路口处的水平涡旋有利于主路的污染物扩散; $X=100$ m处为高架桥正下方中心行人呼吸高度的CO无量纲浓度分布,高架桥上引桥下方浓度最高。由图2(a)可知:流场流线上引桥两侧产生绕流,导致上引桥下方流速极低,污染物产生聚积不易扩散,随主路的延伸高架桥水平路段下方CO无量纲浓度逐渐降低。

图3(b)为靠近地面7.5 m,平行于主路方向Y轴的CO无量纲浓度分布。由图3(b)可知: $Z=7.5$ m处辅路CO分布规律与图3(a)接近,但浓度值稍低;在 $X=85$ m位置处,CO浓度在来流风向作用下不断累积,在十字路口处达到高值,而后降低保持稳定,水平涡旋和上升涡旋的共同作用是拐角处CO浓度升高的主要原因; $X=100$ m为高架桥面中心上方的CO浓度分布,在上引桥段,无量纲浓度不断攀

升,而后在高架桥面水平段保持稳定,在下引桥段逐渐降低,这是由于高架桥的隔断作用,使桥上和桥下的 CO 分布规律截然不同所致。

图 3(c)为靠近地面 1.5 m,平行于辅路 X 轴方向的 CO 浓度分布.由图 3(c)可知:在 $Y=50$ m 处,发现主干道上方和高架桥下方 CO 浓度极高,靠近主路两侧 CO 浓度急剧下降;在 $Y=250$ m 处,高架桥下方 CO 浓度有明显降低,说明高架桥的存在改变了街道后半段污染物浓度,产生聚积的现象;在 $Y=142$ m 与 $Y=158$ m 处,辅路迎风面与背风面的 CO 分布规律极为相似,辅路迎风面 CO 浓度略高于背风面,在十字路口主干道靠近建筑位置,CO 无量纲浓度急剧升高,出现 2 个最高值,而在高架桥下方又有所回落,这与十字路口主干道处的收缩气流有关。

图 3(d)为靠近地面 7.5 m,平行于辅路 X 轴方向的 CO 无量纲浓度分布.由图 3(d)可知:高架桥上方 CO 无量纲浓度保持稳定;其他位置的 CO 分布规律极为相似,仅 CO 浓度值偏小,主干道高架桥面上的 CO 浓度几乎是辅路同一高度的两倍,说明高架桥的存在明显提高了街谷 CO 分布高度。

2.2 来流风向垂直于高架桥方向

2.2.1 流场分布 来流风向垂直于高架桥的十字路口街道内流线分布,如图 4 所示.图 4(a)为 $Y=50$ m 截面,主路处是高宽比为 1:1 的孤立街谷.由图 4(a)可知:受上游阻挡建筑的影响,来流风在上游建筑上端产生上跃激流,街谷内涡旋消失,气流沿迎风面向下,在街谷中下部水平向左,绕流经高架桥运动至背风面竖直向上.图 4(b)为 $Y=130$ m 截面,主路处是高宽比为 1:1 的非孤立街谷.由图 4(b)可知:来流风在街谷上方平滑掠过,气流自街谷中心偏左位置,呈顺时针发散射出.图 4(c)为近地面 1.5 m 处行人呼吸高度.由图 4(c)可知:流场流线经辅路在十字路口主路背风面处产生明显的水平涡旋.图 4(d)为高架桥面上方 1.5 m 处行人呼吸高度.由图 4(d)可知:在十字路口主路处水平涡旋中心位置发生改变,结构变小。

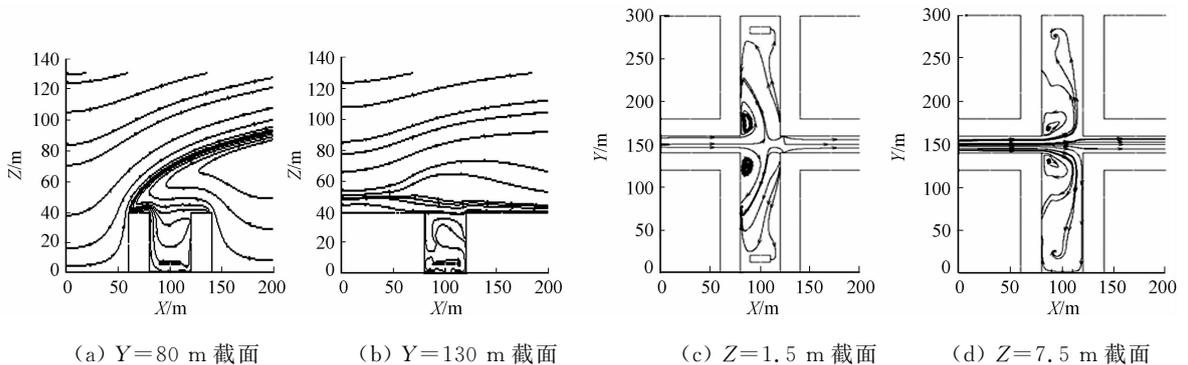


图 4 流场特性分布图 2

Fig. 4 Distribution diagram of flow field characteristics 2

2.2.2 污染物分布 风向垂直于高架桥方向的 CO 无量纲浓度分布情况,如图 5 所示.由图 5 可知:当风向垂直于高架桥方向时,存在高架桥的十字路口对 CO 无量纲浓度分布影响显著,其原因是高架桥的结构和十字路口共同影响了街谷内部涡旋结构及涡旋方向。

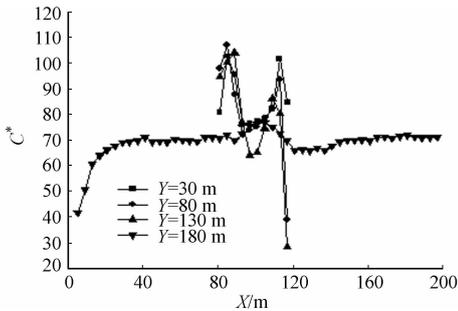
图 5(a)为靠近地面 1.5 m,平行于辅路方向 X 轴的 CO 无量纲浓度分布.由图 5(a)可知: $Y=30$ m 与 $Y=80$ m 分别为远离和靠近十字路口的辅路 CO 分布,分布规律较为相似,浓度在主路两侧人行道达到最高值,背风面的 CO 浓度值稍高于迎风面,在主路中心位置保持较低的稳定值,这是由于高架桥的存在破坏了街谷内涡旋,使爬墙效应不复存在; $Y=130$ m 处为十字路口拐角处的 CO 分布,与前两项分布规律较为相似,仅在高架桥下方污染物浓度较低,这是由于十字路口处的水平涡旋的清洁作用所致; $Y=150$ m 处辅路中心的 CO 分布,其 CO 浓度整体低于主路,在高架桥下方达到最高值。

图 5(b)为靠近地面 7.5 m,平行于辅路方向 X 轴的 CO 无量纲浓度分布.由图 5(b)可知:在 $Y=30$ m 处,污染物的分布符合爬墙效应;在 $Y=80$ m 与 $Y=130$ m 处,皆为主路背风面 CO 浓度最高,在高架桥上方保持稳定,迎风面浓度急剧降低;在 $Y=150$ m 处,高架桥上方 CO 无量纲浓度约是辅路的 2 倍。

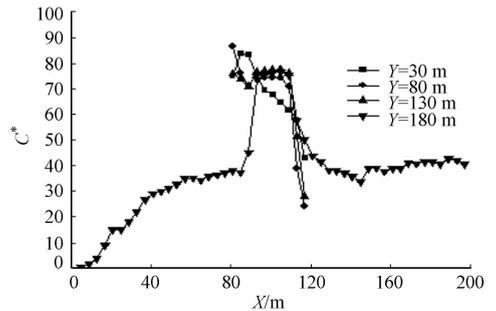
图 5(c)为靠近地面 1.5 m,平行于主路方向 Y 轴的 CO 无量纲浓度分布.由图 5(c)可知:在 $X=50$ m 与 $X=150$ m 处,辅路 CO 分布皆为为中心位置最高,两侧人行道最低;在 $X=85$ m 处,主路街谷背风

面的主路 CO 保持着极高的浓度,是十字拐角处的 1.5 倍;在 $X=100\text{ m}$ 处,主路高架桥中心正下方,在十字路口处的 CO 浓度与 $X=85\text{ m}$ 处接近,在十字拐角处略有下降,主路位置与十字路口浓度保持一致;在 $X=115\text{ m}$ 处,主路街谷迎风面十字路口处的 CO 浓度值与上述位置基本相同,而在十字拐角处急剧降低,在主路两端位置重新迅速升高,再次验证十字路口处水平涡旋的清洁作用,而在主路两端水平涡旋消失,高架桥的存在又破坏了主路街谷的爬墙效应,导致迎风面 CO 重新聚积浓度升高。

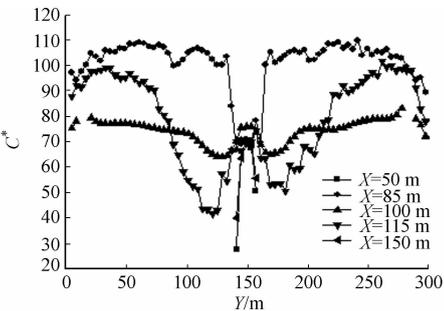
图 5(d)为靠近地面 7.5 m,平行于主路方向 Y 轴的 CO 无量纲浓度分布.与图 5(c)相比较可知:在 $X=50\text{ m}$ 与 $X=150\text{ m}$ 处,仅在 CO 无量纲浓度值上有所减小,分布规律基本一致;在 $X=85\text{ m}$ 处,主路段背风面 CO 浓度最高,在靠近十字路口拐角处有所降低,在十字路口处则急剧降低;在 $X=100\text{ m}$ 处,高架桥上方的 CO 浓度分布与高架桥下方基本保持一致,说明主路中心高架桥面上上下下皆被笼罩在高浓度 CO 污染物中;在 $X=115\text{ m}$ 处,主路段迎风面 CO 浓度明显低于主路段其他位置,这是街谷中高架桥上方顺时针的清洁来流的作用所致,而十字路口处的 CO 浓度稍高于主路段其他位置,这是由平行于辅路的来流将高架桥上产生的 CO 吹送至此所致。



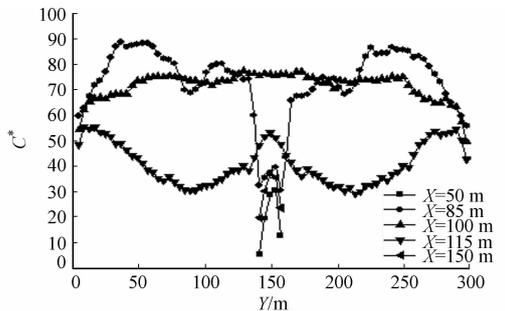
(a) Y 轴截面距地面 1.5 m 处



(b) Y 轴截面距地面 7.5 m 处



(c) X 轴截面距地面 1.5 m 处



(d) X 轴截面距地面 7.5 m 处

图 5 风向垂直于高架桥方向的 CO 无量纲浓度分布

Fig. 5 Dimensionless CO concentration distribution perpendicular to the viaduct

3 结论

1) 当来流风向平行于含高架桥主干道街谷方向时,受高架桥上下引桥的阻挡作用,来流在上引桥下方收缩形成低风速涡旋,造成高浓度 CO 淤积,随着高架桥水平路段的延伸,高架桥下方 CO 浓度逐渐降低,改变了街道后半段污染物浓度会产生聚积的现象;高架桥上方行人呼吸高度处 CO 始终保持极高浓度,几乎是辅路同一高度的 2 倍;十字路口拐角处的水平涡旋会将主路上的高浓度 CO 带入辅路。

2) 当来流风向垂直于含高架桥主干道街谷方向时,高架桥的阻挡改变了主干道背风面污染物的爬墙效应,其下方主干道迎风面和背风面 CO 不易扩散,保持较高浓度;在主干道高架桥上方行人呼吸高度处,街谷内顺时针的清洁来流使迎风面 CO 浓度最低,背风面和高架桥中心位置 CO 浓度极高。

3) 无论来流风向为平行或垂直于高架桥,受街谷中高架桥桥面的阻挡作用,主干道高架桥下方 CO 难以向上扩散,保持较高浓度;街道背风面污染物不易被来流风清洁,浓度相对较高;十字路口拐角处受水平涡旋和上升涡旋的共同作用,污染物浓度明显高于街谷其他部位,且上扬势态明显.行人应避免长期待在高架桥下方、街道背风面及十字路口拐角处,尽可能减轻街谷内污染物对人体造成的伤害。

参考文献:

- [1] 杨柳. 基于交通流控制的城市交通环境颗粒物污染特征研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [2] 曹国良,张小曳,龚山陵,等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. 科学通报,2011,56(3):261-268. DOI:10.1007/s11434-011-4373-7.
- [3] 王宝民,柯咏东,桑建国. 城市街谷大气环境研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版),2005,41(1):146-153. DOI:10.3321/j.issn:0479-8023.2005.01.021.
- [4] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报,2013,58(13):1178-1187. DOI:10.1360/972013-150.
- [5] 胡彬,陈瑞,徐建勋,等. 雾霾超细颗粒物的健康效应[J]. 科学通报,2015,60(30):2808-2823. DOI:10.1360/N972014-01404.
- [6] COOKE R M, WILSON A M, TUOMISTO J T, *et al.* A probabilistic characterization of the relationship between fine particulate matter and mortality: Elicitation of European experts[J]. Environmental Science and Technology, 2007,41(18):6598-605. DOI:10.1021/es0714078.
- [7] 赵敬源,刘加平. 城市街谷绿化的动态热效应[J]. 太阳能学报,2009,30(8):1013-1017. DOI:10.3321/j.issn:0254-0096.2009.08.002.
- [8] 陈晓萌,亢燕铭,杨方,等. 上游阻挡建筑间距对街谷内空气环境的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(7):1967-1973. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2016.07.008.
- [9] CHAN A T, SO E S P, SAMAD S C. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality[J]. Atmospheric Environment, 2001,35(32):5681-5691. DOI:10.1016/S1352-2310(01)00483-6.
- [10] BAIK J J, KIM J J. On the escape of pollutants from urban street canyons[J]. Atmospheric Environment, 2002,36(3):527-536. DOI:10.1016/S1352-2310(01)00438-1.
- [11] SANG J J, ANDREWS M J. Application of the $k-\epsilon$ turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon[J]. Atmospheric Environment, 2002,36(7):1137-1145. DOI:10.1016/S1352-2310(01)00569-6.
- [12] 田丰. 街道峡谷内机动车尾气扩散的数值模拟研究[D]. 广州:中山大学,2007.
- [13] HANG Jian, LI Yuguo, SANDBERG M, *et al.* The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas[J]. Building and Environment, 2012,56(10):346-360. DOI:10.1016/j.buildenv.2012.03.023.
- [14] 蒋德海,蒋维楣,苗世光. 城市街道峡谷气流和污染物分布的数值模拟[J]. 环境科学研究,2006,19(3):7-12. DOI:10.3321/j.issn:1001-6929.2006.03.004.
- [15] KONDO H, TOMIZUKA T. A numerical experiment of roadside diffusion under traffic-produced flow and turbulence[J]. Atmospheric Environment, 2009,43(27):4137-4147. DOI:10.1016/j.atmosenv.2009.05.047.
- [16] 张传福,曾建荣,文谋,等. 高架桥对街道峡谷内大气颗粒物运输的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(2):159-164. DOI:10.13198/j.res.2012.02.37.zhangchf.016.
- [17] 张颖慧. 有高架的城市街道峡谷内颗粒物扩散的数值模拟研究[D]. 济南:山东大学,2016.
- [18] 李志远. 高架下街谷内可吸入颗粒物浓度扩散的实验研究[D]. 上海:东华大学,2016.
- [19] 姚静波,王明新,齐今笛,等. 高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例[J]. 环境科学,2017,38(5):1807-1816. DOI:10.13227/j.hjks.201611043.
- [20] 王建国. 基于城市设计的大尺度城市空间形态研究[J]. 中国科学(E辑),2009,39(5):830-839.
- [21] 彭皓,雷飞. 医药洁净室的计算流体力学模拟及实测对比[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2015,36(1):49-54. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.01.0049.
- [22] NAZRIDOUST K, AHMADI G. Airflow and pollutant transport in street canyons[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006,94(6):491-522. DOI:10.1016/j.jweia.2006.01.012.
- [23] 顾兆林,张云伟,雷康斌. 不同大气稳定度下绿化街谷流动的大涡模拟[J]. 中国科学:技术科学,2011(1):109-118. DOI:10.1007/s11431-010-3243-x.
- [24] 杨方. 街区与建筑室内空气环境耦合特征的研究[D]. 上海:东华大学,2015.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)