

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-034-06

交通风作用下的 城市公路隧道污染扩散特性数值模拟研究

赵宇¹ Nawaz Ali¹ 宋晓程² 江超文¹ 冯瑶¹

(1. 大连理工大学建设工程学部土木工程学院 大连 116024;

2. 大连大学建筑工程学院 大连 116622)

【摘要】 随着中国经济的快速发展,汽车保有量快速增加,大中城市交通拥堵情况愈发严重。近年来,城市公路隧道作为缓解山区和丘陵城市交通状况的有力工具得到蓬勃发展。隧道作为封闭环境,机动车排放污染物易在隧道内部聚集。现有研究中对隧道内部复杂多变的交通风特性研究较为匮乏。以上述关键问题为突破口,将车辆行进产生交通风作为动量方程、湍流动能方程和湍流耗散率方程的附加源项添加到 Realizable $k-\varepsilon$ 模型中,在不同车辆行驶速度对长大公路隧道污染物扩散进行数值模拟研究,结果表明,在高密度车流量情况下,隧道内部交通风对污染物沿长度方向的传播具有明显的促进作用,对于3km的长大隧道而言,污染物沿程分布已由线性变成了二次抛物线分布,隧道出口段的污染极为严重,对驾乘人员身心健康影响较大。研究成果可作为城市公路隧道驾乘人员污染暴露研究的基础,同时可为基于污染物动态分布特性下通风系统的智能化调控提供指导和依据。

【关键词】 城市公路隧道; 交通风; 污染扩散; 数值模拟
中图分类号 TU831 文献标识码 A

Numerical Simulation of Pollutant Dispersion under the Effect of Traffic Wind Inside Urban Road Tunnel

Zhao Yu¹ Nawaz Ali¹ Song Xiaocheng² Jiang Chaowen¹ Feng Yao¹

(1. School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024;

2. Civil and Architectural Engineering College, Dalian University, Dalian, 116622)

【Abstract】 Due to the rapid development of economy in China, the number of vehicles has dramatically increased and traffic jams become a more serious issue, especially for the metropolitan in China. Recently, urban road tunnels have been prevalent in the areas with several hills and mountains. However, the enclosed structure and continuous exhaust from vehicles strengthen the pollution inside the tunnel. Meanwhile, the current researches on the pollutant dispersion under the effect of traffic wind induced by the vehicle movement is not sufficient. Thus, this paper focused on the abovementioned issues, simulated the pollutant dispersion patterns inside super long urban road tunnel with high traffic flow conditions, by employing the Realizable $k-\varepsilon$ model with the traffic induced vehicle additional source terms including momentum equation, energy equation and turbulence equation. The results indicated that when traffic flow maintained as high levels, piston effect induced by vehicle movement dominated the pollutant

基金项目: 国家自然科学基金(51808095); 中央高校基本科研业务费(DUT21JC43)

作者简介: 赵宇(1987.01-), 男, 博士, 讲师, E-mail: zhaoyu1220@dlut.edu.cn

通讯作者: 宋晓程(1987.05-), 女, 博士, 讲师, E-mail: sxciscc@163.com

收稿日期: 2021-07-02

dispersion from the entrance to the exit inside tunnel. A parabola interpolation increase patterns for CO concentration was observed along the traffic direction, which was different from the linear relationship for shorter tunnels. Extreme high pollution appeared at the exit of the tunnels and then threatened the health of drivers and passengers. The conclusion in the paper could be the fundamentals and guidance of human exposure risk, optimization and smart control of ventilation systems inside super long urban road tunnels in the future.

【Keywords】 Urban road tunnel; Traffic wind; Pollutant dispersion; Numerical simulation

0 引言

由于结构封闭、单体长度长和污染物聚集效果明显等特点, 长度通常在 1km 以上的城市长大公路隧道内污染暴露水平远远高于一般大气环境和室内环境。同时, 现有城市公路隧道通风系统受运行能耗和年均运行电费高的制约, 全年有效开启时间极少, 这进一步加剧了隧道内部污染积聚效果^[1]。即便驾乘人员在公路隧道内停留时间较短, 现有研究已经证实, 隧道内部浓度较高的污染物会严重危害人员的身心健康^[2]。隧道主要污染物中, 一氧化碳 (CO) 会降低血液内含氧量, 在浓度较高条件下会严重影响人员行为和工作效率^[3,4]。氮氧化物 (NO_x) 能严重影响支气管功能, 并可能引发哮喘等疾病^[5-8]。因而, 隧道内部以 CO 和 NO_x 为代表的污染扩散及暴露水平的研究对后续健康风险评估及通风系统运行优化的支撑作用尤为显著。

国内外学者针对隧道内部车辆运动交通风、污染物扩散及暴露特性进行了一系列研究^[9-12], 特别是车辆运动尾流区内污染扩散特性的分析更是研究的热点和焦点^[13,14]。在公路隧道中, 车速、车辆类型和隧道车辆通行特点等因素是影响隧道车辆运动过程中污染扩散的主要因素^[15-17]。同时从研究方法的角度看, 现场实测、风洞实验和数值模拟是隧道污染扩散问题的主要研究方法。现场实测和风洞实验方法通常具有研究条件受限、研究经费高等劣势, 因而数值模拟成为近年来上述污染扩散问题的主要研究手段。现有研究中, 学者们通过建立一维^[18]、二维^[19]和三维^[20]隧道模型模拟分析不同车辆运行条件下的污染物扩散特性。然而, 现有研究所建立模型长度通常控制在 1km 以下, 对长度在 1km 以上的超长隧道内污染扩散的研究较为有限, 同时, 对于交通风的影响研究较为有限, 研究成果远远不能指导隧道通风系统的优化运行。

本文针对现有研究存在的问题, 利用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和被动标量模型, 模拟 3km 超

长隧道内多辆车在车速 60km/h, 40km/h 和 20km/h 条件下 CO 和 NO_x 污染扩散特性, 研究成果可作为未来隧道通风运行优化、污染暴露及健康风险评估的基础和依据。

1 研究方法

本研究采用 Realizable $k-\varepsilon$ 两方程模型分析隧道内部湍流特性, 由于 Realizable $k-\varepsilon$ 两方程模型主要模拟高雷诺数流动, 对于近壁面的低雷诺数流动不适用; 因而, 在近壁面采用壁面函数法进行处理。同时考虑到车辆行驶交通风的影响, 将车辆行驶过程诱导产生的交通风特性作为动量源项、湍动能源项和湍流耗散率源项进行分析, Realizable $k-\varepsilon$ 模型的基本方程如式 (1) - (4) 所示, 交通风源项的表达方法如式 (5) - (7) 所示。

$$\frac{\partial \langle \rho u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \langle u_i u_j' \rangle \right] - F_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial (\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + \rho F_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + \rho F_\varepsilon \quad (4)$$

$$F_m = \frac{1}{2} C_{f-car} \frac{A_{car}}{V_{fluid}} (\langle u_i \rangle - u_{cari}) \sqrt{(\langle u_j \rangle - u_{carj})^2} \quad (5)$$

$$F_k = (\langle u_i \rangle - u_{cari}) F_m \quad (6)$$

$$F_\varepsilon = \frac{\varepsilon k^{3/2}}{k L_{car}} C_{\varepsilon-car} \quad (7)$$

式中: $\langle \rangle$ 为时均值; t 为时间; x_i 为空间位置坐标; u_i, u_j 为 i 和 j 方向上的平均速度分量; ρ 为

空气密度; p 为气压; u_i', u_j' 为雷诺平均应力; μ 为动力粘度; ν 为运动粘度; μ_t 为湍流粘度; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 为 k 和 ϵ 的湍流普朗特数; k 为湍流动能; ϵ 为湍流耗散率; G_k, G_b 为由平均速度梯度和浮力产生的湍流动能; Y_m 为可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的贡献; F_m, F_k 和 F_ϵ 为由于 VIT 引起的附加源项 $C_{1\epsilon}, C_2, C_{3\epsilon}, \sigma_k$ 和 σ_ϵ 为常数系数, 分别取 1.44、1.9、1.44、1.0 和 1.2; C_{f-car} 为汽车的截面阻力系数; A_{car} 为垂直于交通方向的车辆前部区域面积; V_{fluid} 为单位体积内的流体体积; u_{cari}, u_{carj} 为 i 和 j 方向的车速; L_{car} 为无间隙安装车辆时箱子的平均周长; $C_{\epsilon-car}$ 为 L_{car} 与湍流长度尺度的比值。

对于 CO 和 NO_x 扩散, 本文采用欧拉-欧拉模型进行模拟, 主控方程如下所示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i C - (D + \tau) \frac{\partial C}{\partial x_i}] = S \quad (8)$$

式中: C 为污染物浓度; D 为污染物的分子扩散率; τ 为污染物的湍流扩散率; S_c 为污染物浓度变化源项, 本文研究过程中取 0。

研究过程中, 考虑实际计算软件对几何尺寸的限制, 本文建立一个长 450m 的隧道模型, 隧道内分 9 排布置 36 台车辆, 车辆间距根据中华人民共和国道路交通安全法中安全行车距离的要求确定为 50m。模型中车辆长宽高尺寸分别为 4.5m、1.8m 和 1.5m, 在车辆右后方的尾部区域设置一个直径为 0.05m 的排气管, 排气管中心离地 0.3m。机动车排气管出口设置为速度入口边界条件, 排气速度、温度及排放污染物浓度如表 1 所示。排气口湍流条件设置包括湍流强度和湍流特征长度, 其中湍流特征长度为排气管直径 0.05m, 湍流强度 I 计算公式如式 (9) 所示。经过计算, 排气管出口湍流强度为 0.0373。在隧道顶部设置相应的射流风机, 由于计算资源限制, 本次模拟不考虑射流风机开启对隧道污染扩散特性的影响, 待后续研究中进一步分析考虑。研究过程中所建模型如图 1 所示。

$$I = 0.16 Re^{1/8} \quad (9)$$

式中: Re 为雷诺数。

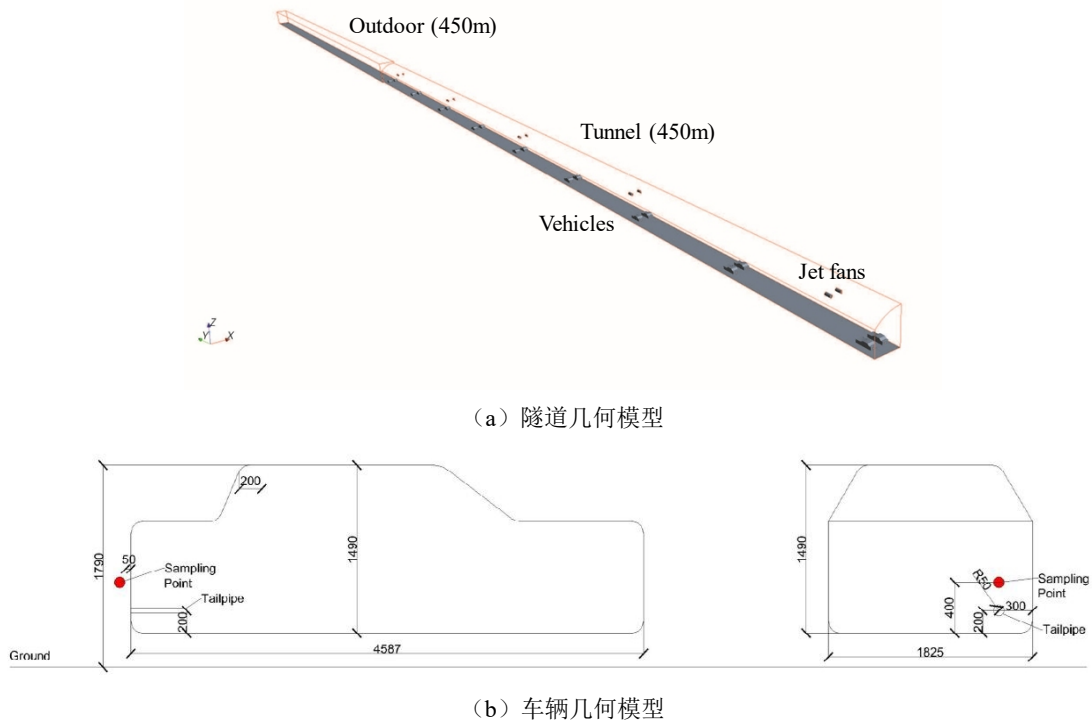


图 1 隧道和车辆几何模型 (单位: mm)

Fig.1 Geometry model for tunnel and vehicles (Dimension: mm)

由于本文聚焦于 3km 左右长大隧道的研究过程中, 上文所述几何模型尺寸远远小于 3km, 因而, 本文在模拟过程中采用边界条件传递方法, 分别建

立 7 段算例, 将上一段算例出口边界条件传递到下一段算例入口断面, 进而完成了车辆行驶交通风特性及污染扩散规律沿长大隧道长度方向的传递。模

拟过程中, 建立了 924645 个六面体结构化网格, 并将首段隧道入口和出口断面分别设置成压力入口和出口, 其他段隧道入口断面设置成速度入口, 机动车排气口设置成速度入口, 其他断面均设置成

无滑移壁面, 根据中国机动车基准排放数值, 并考虑年均 2% 的衰减系数, 确定机动车排放 CO 和 NO_x 浓度。同时结合前期研究成果, 确定隧道模拟过程中初边值条件, 如表 1 所示。

表 1 模拟过程中的初边值条件

Table 1 Initial and boundary conditions during the simulation

行车速度 (km/h)	初始条件			机动车排放条件			
	温度 (K)	风速 (m/s)	CO 浓度 (ppm)	排气温 (K)	排气速度 (m/s)	排气 CO 浓度 (ppm)	排气 NO _x 浓度 (ppm)
20						679	64
40	293.15	各方向均为 0	0	350	8	1029	84
60						1320	127

本文所建立的模型和模拟方法已在课题组前期研究中经过充分验证^[11,12]。模拟过程中分别采用二阶迎风格式和 SIMPLE 方法进行主控方程中对流项和压力-速度耦合, 当连续性方程和能量方程残差达到 10⁻⁶, 其他方程计算残差达到 10⁻⁴时, 认为计算收敛。

2 结果分析与讨论

图 2 和图 3 分别为入口和出口 450m 段离地高度 1m 表面的 CO 浓度分布特性。上述两图中所示的结果表明, 随着交通风的作用, 沿车行方向 CO 浓度快速增长。这表明交通风对 CO 浓度的分

布具有很明显的推动作用。在隧道内多排车持续运动过程中, 驾乘人员口鼻所处的 1m 高度平面 CO 浓度在入口段 200m 以外区域即基本超过 150ppm 的浓度限值。同时, 多排车之间区域污染聚集现象十分明显, 且浓度值随着行车距离的增加而快速增长。图 3 的结果进一步表明, 在隧道出口段, 驾乘人员口鼻高度 1m 平面上的 CO 浓度明显高于入口段, 处于 500~1300ppm 范围内, 约为入口段 8 倍左右。如此高的污染物浓度会对驾乘人员身心健康产生严重影响, 即使在隧道内部停留的时间比较短。

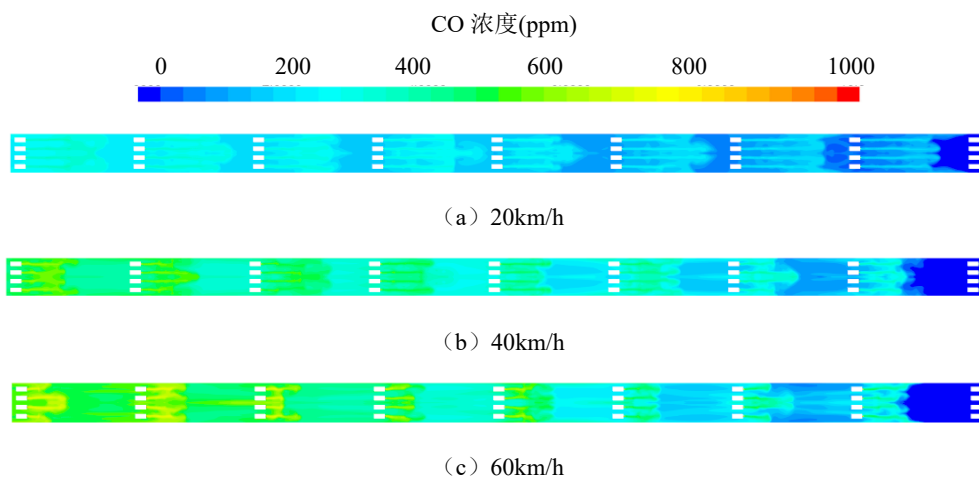
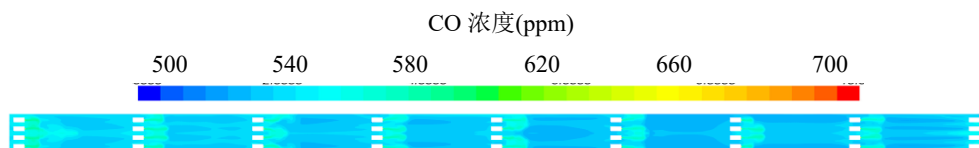


图 2 不同行车速度下隧道入口段 450m 范围内 z=1m 高度平面 CO 浓度

Fig.2 CO concentration at the section z=1m inside the first 450 m tunnel from the entrance under different vehicle speeds



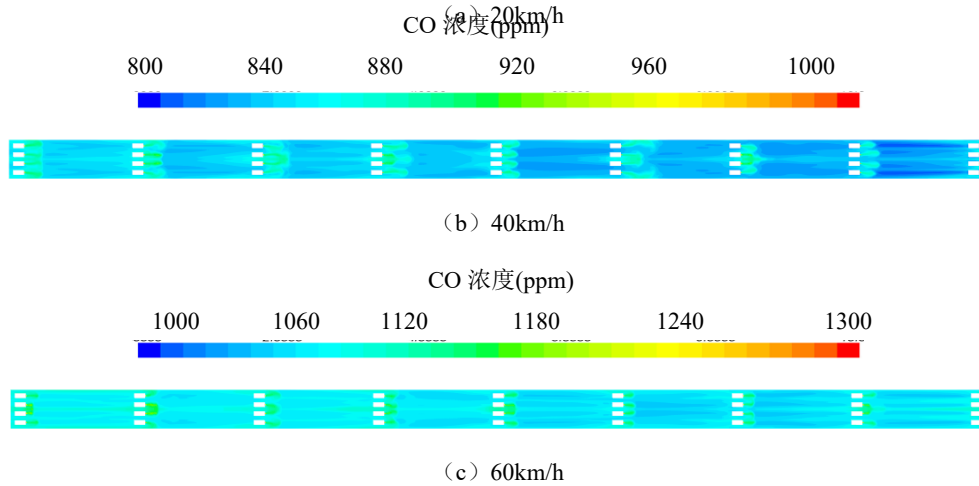


图3 不同行车速度下隧道出口段 450m 范围内 z=1m 高度平面 CO 浓度

Fig.3 CO concentration at the section z=1m inside the last 450 m tunnel from the entrance under different vehicle speeds

图4为沿隧道方向CO浓度的变化特性。图中各点数据为不同纵截面的平均值。从图中可以看出，在长度达到3km隧道，与以往研究中提到污染物浓度线性分布特性不同，隧道长度方向的污染分布呈现二次抛物线特性， $R^2=0.976$ 。在隧道入口段长度1000m范围内，污染物线性变化的规律较好，但超过1000m后，污染物浓度变化逐渐放缓。当高密度车流量运行时，隧道出口段浓度已上升到1000ppm，大大超过150ppm的限值。隧道高密度车流量时，通风系统开启对降低污染物的作用至关重要。

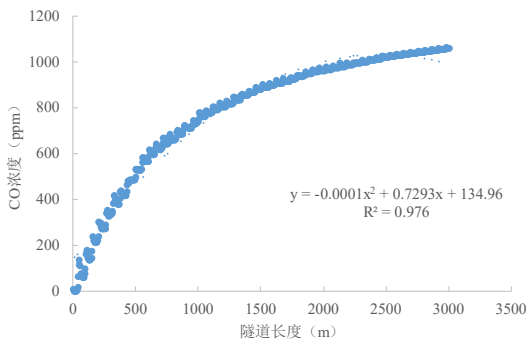


图4 沿隧道长度方向不同位置 CO 浓度变化特性

Fig.4 CO concentration distribution along the traffic flow direction inside the tunnel

3 结论

本文以城市长大隧道为研究对象，重点研究了不同车辆行驶速度下污染物沿隧道长度方向的分布特性，细化了通风这一关键动态因素对隧道通

风系统的影响程度及水平，本文的主要结论如下：

- (1) 隧道交通风对污染物沿长度方向的传播具有明显的促进作用；
- (2) 驾乘人员口鼻所处的1m高度平面CO浓度在入口段200m以外区域即基本超过150ppm的浓度限值；
- (3) 对于长度达到3km的超长公路隧道而言，隧道长度方向的污染分布呈现二次抛物线特性， $R^2=0.976$ 。

现阶段，我国城市公路隧道通风系统运行尚处于人工经验和手动控制为主的粗放管控阶段，通风系统从设计和运维阶段均未充分考虑隧道交通风的影响，本文对交通风特性的研究作为城市公路隧道通风系统自动管控的基础，为未来在城市公路隧道内实现通风系统自动按需控制提供了理论基础和技术支持。但受限于计算条件的限制，本文研究中未考虑车辆运行和通风系统同时开启条件下的污染物沿程分布规律，未来会继续研究车辆交通风和通风系统共同作用下的隧道污染物分布特性，并基于研究成果开发相关通风系统智能管控平台，力争在实际工程中得到应用，真正实现城市长大公路隧道通风系统按需自动控制，切实解决城市长大隧道内污染水平高、卫生条件差等一系列问题。

参考文献：

[1] Y Zhao, C Jiang, X Song, et al. Modelling particle diffusion patterns inside urban road tunnels in Dalian, China, employing annual field measurement[J]. Build.

- Environ., 2021,194:107681.
- [2] M Svartengren, V Strand, G Bylin, et al. Short-term exposure to air pollution in a road tunnel enhances the asthmatic response to allergen[J]. *Eur. Respir. J.*, 2000,15:716-724.
- [3] LD Prockop, RI Chichkova. Carbon monoxide intoxication: an updated review[J]. *J. Neurol Sci.*, 2007, 262:122-130.
- [4] M Mathur, G Mathur, M Mathur. Assessment of carbon monoxide at traffic signals, toll plazas and in main roadside built houses and impact of its chronic exposure on public health[J]. *Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol.*, 2017,3:224-226.
- [5] L Folinsbee, LJ Beem. Does nitrogen dioxide exposure increase airway responsiveness?[J]. *Toxicol Ind. Health*, 1992,8:273-283.
- [6] W Tunnicliffe, P Burge, J Ayres. Effect of domestic concentrations of nitrogen dioxide on airway responses to inhaled allergen in asthmatic patients[J]. *Lancet*, 1994,344:1733-1736.
- [7] V Strand, S Rak, M Svartengren, et al. Nitrogen dioxide exposure enhances asthmatic reaction to inhaled allergen in subjects with asthma[J]. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 1997,155:881-887.
- [8] V Strand, M Svartengren, S Rak, et al. Repeated exposure to an ambient level of NO₂ enhances asthmatic response to a nonsymptomatic allergen dose[J]. *Eur. Respir. J.*, 1998,12:6-12.
- [9] A G Venetsanos, D Vlachogiannis, A Papadopoulos, et al. Studies on pollutant dispersion from moving vehicles[J]. *Water Air Soil Poll.*, 2002,2:325-337.
- [10] A M Sahlodin, R Sotudeh-Gharebagh, Y Zhu. Modeling of dispersion near roadways based on the vehicle-induced turbulence concept[J]. *Atmos. Environ.*, 2007,41:92-102.
- [11] X Song, Y Zhao. Numerical investigation of airflow patterns and pollutant dispersions induced by a fleet of vehicles inside road tunnels using dynamic mesh part I: Traffic wind evaluation[J]. *Atmos. Environ.* 2019,212: 208-220.
- [12] X Song, Y Zhao. Numerical investigation of airflow patterns and pollutant dispersions induced by a fleet of vehicles inside road tunnels using dynamic mesh part II: Pollutant dispersion and exposure levels[J]. *Atmos. Environ.*, 2019,210:198-210.
- [13] I Kanda, K Uehara, Y Yamao, et al A wind-tunnel study on exhaust gas dispersion from road vehicles-Part I: Velocity and concentration fields behind single vehicles[J]. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 2006,94:639-658.
- [14] M Carpentieri, P Kumar, A Robins. Wind tunnel measurements for dispersion modelling of vehicle wakes[J]. *Atmos. Environ.*, 2012,62:9-25.
- [15] RE Eskridge, WB Petersen, ST Rao. Turbulent diffusion behind vehicles: effect of traffic speed on pollutant concentrations[J]. *J. Air. Waste Manage. Assoc.*, 1991,41: 312-317.
- [16] Å Sjödin, M Lenner. On-road measurements of single vehicle pollutant emissions, speed and acceleration for large fleets of vehicles in different traffic environments[J]. *Sci. Total Environ.*, 1995,169:57-165.
- [17] M M Karim, H Matsui, R Guensler. A mathematical model of wind flow, vehicle wake, and pollutant concentration in urban road microenvironments[J]. *Transport. Res. Part D-Transport. Environ.*, 1998,3:171-191.
- [18] CJ Lin, YK Chuah, CW Liu. A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system[J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2008,28:372-379.
- [19] M Liu, C Zhu, T Cui, et al. An alternative algorithm of tunnel piston effect by replacing three-dimensional model with two-dimensional model[J]. *Build. Environ.*, 2018,128:55-67.
- [20] H Dou, T Ming, Z Li, et al. Numerical simulation of pollutant dispersion characteristics in a three-dimensional urban traffic system[J]. *Atmos. Pollut. Res.*, 2018,9:735-746.