

交通风对不同结构城市地下道路污染物扩散影响的比较研究*

李琼^{1,2} 陈超^{1#} 许淑惠³ 袁浩庭¹

(1.华北科技学院建筑工程学院,河北 三河 065201;2.北京工业大学建筑工程学院,北京 100124;

3.北京建筑大学环境与能源工程学院,北京 100044)

摘要 以往关于交通通风力的研究多集中在直隧道,而关于近年多出现的有分岔的城市地下道路的研究甚少。根据项目组关于上海市翔殷路越江隧道(直隧道)和长沙市营盘路湘江隧道(分岔隧道)的交通特征、交通风速以及污染物浓度水平的实测结果,重点开展了交通通风力对不同结构城市地下道路污染物扩散特性影响的比较研究。结果表明:相同交通流量条件下,有分岔的主隧道产生的平均交通风速(2.24~3.44 m/s)虽小于直隧道的(3.06~4.76 m/s),但由于分岔匝道对污染物的分流作用,有分岔的主隧道的污染物浓度变化率低于直隧道;当平均车速为30 km/h时,受合流匝道带入室外空气稀释作用的影响,相当于为分岔隧道增加了20.9%的通风量,受分流匝道带出污染物的影响,相当于为分岔隧道增加了16.7%的通风量。研究结果可为分岔城市地下道路内污染物浓度水平的有效控制及其通风系统的优化设计提供参考。

关键词 分岔城市地下道路 污染物浓度分布 现场实测 交通通风力 需风量

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.11.003

Comparative research on pollutant dispersion based on traffic force in urban straight tunnel and bifurcation tunnel LI Qiong^{1,2}, CHEN Chao¹, XU Shuhui³, YUAN Haoting¹. (1. College of Architecture and Civil Engineering, North China Institute of Science and Technology, Sanhe Hebei 065201; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 3. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract: Previous studies are mainly focused on traffic force in straight tunnel, but little in bifurcation tunnel which often appears in recent years. The traffic characteristics, air velocity and the carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) concentrations were measured by our project team in Shanghai Xiangyin Road Tunnel (straight tunnel) and Changsha Yingpan Road Tunnel (bifurcation tunnel). The research was focused on the variation of pollutant dispersion with traffic force in those two different structure tunnels. Measurement results showed that the average air velocity (2.24-3.44 m/s) in bifurcation tunnel was less than in straight tunnel (3.06-4.76 m/s) under the same traffic flow. The change rate of pollutant concentrations in bifurcation tunnel were less than in straight tunnel because of the distribution of pollutants throughout the distributary ramp. When the average vehicle speed was 30 km/h, the air flow came from the confluence ramp could dilute pollutant concentration levels in the main tunnel of bifurcation tunnel, which was equivalent an increase of 20.9% for the tunnel's ventilation. Similarly, the distributary ramp could split out pollutants from the main tunnel of bifurcation tunnel, which was equivalent an increase of 16.7% for the tunnel's ventilation. The result could provide a quantitative assessment method to support pollutant concentration control and optimal the ventilation design in bifurcation tunnel.

Keywords: bifurcation tunnel; concentration distribution; field measurement; traffic force; required volume

交通通风力是机动车为了克服其运动过程中受到的气动阻力而产生的推动空气向前流动的作用力,它和自然通风力都可以引起隧道内空气流动。但与一般公路隧道所不同的是,由于城市地下道路为下凹线型结构,一般意义的自然通风力(例如,隧

道外自然风引起的气压坡度差、隧道内外温差引起的热压差以及隧道外季风吹入洞口产生的压差等)对其内污染物的输运与扩散作用非常小,交通通风力成为影响单向隧道内机动车排放污染物的扩散与输运的主要因素,可以说它在一定程度上起到隧道

第一作者:李琼,女,1978年生,博士,副教授,主要从事隧道污染物通风控制研究。*通讯作者。

*北京市自然科学基金资助项目(No.8162006);国家自然科学基金资助项目(No.51378024);中央高校基本科研业务费资助项目(No.3142017068);北京市重点实验室研究基金资助项目(No.NR2015K06)。

• 1214 •

通风机的作用。

KATOLICY 等^[1]采用 Eulerian-Lagrangian 准稳态模型分析了交通通风力对隧道运营通风的影响,计算结果显示,交通风速随着交通流量的增大逐渐趋于稳定,且随车速的增加而明显增大。LEE 等^[2]基于 GM 模型和 Crank-Nicholson 模型得到的 FCM 模型,分析了交通风速作用条件下的污染物湍流扩散规律。钟星灿等^[3]针对无分支隧道和隧道顶部设有通风孔的情况,分析了交通通风力对气流运动规律的影响。张素磊^[4]对长直隧道的交通通风力进行了理论分析及数值模拟分析,并以如何利用交通通风力为基础条件对港珠澳海底隧道通风井距离进行了研究。

以往关于交通通风力的研究多集中在直隧道,而关于近年我国多出现的有分岔的城市地下道路的交通通风力的研究甚少,《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02-2014)^[5]虽然给出了交通通风力的计算公式,但是关于有分岔的城市地下道路的交通通风力计算方法仍然不明确。

为此,本研究根据项目组 2012—2015 年关于上海市翔殷路越江隧道(直隧道,以下简称上海隧道)和长沙市营盘路湘江隧道(分岔隧道,以下简称长沙隧道)的交通特征、交通风速以及污染物浓度水平的实测结果,重点开展了关于交通通风力对不同结构城市地下道路(直隧道、分岔隧道)污染物扩散特性影响的比较研究,以期对复杂结构城市地下道路内污染物浓度水平有效控制以及通风系统优化设计提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 隧道概况

项目组应用隧道实测法^[6-7]于 2012—2015 年先后对上海隧道北线和长沙隧道南线的交通特征、交通风速以及污染物浓度水平进行了现场实测。

长沙隧道位于城市中心区,结构复杂,既有分岔、还有地下立交。该隧道为双洞单向两车道的水下隧道,主线长度 2.7 km,隧道北线行车方向由东岸至西岸,东岸设有 C 匝道入口、西岸设有 B 匝道出口;隧道南线由西岸至东岸,西岸设有 A 匝道入口、东岸设有 D 匝道出口。隧道南线包括 620 m 下坡道(坡度为 -5.92%)、1 025 m 直道(坡度 -0.35%)、645 m 上坡道(坡度 +3.85%)、120 m 直道(坡度 +0.35%)和 290 m 上坡道(坡度 +5.85%)。主隧道限速 50 km/h;主隧道断面面积为

54.14 m²,匝道断面面积为 45.82 m²。

上海隧道位于上海市北部,同样位于城市中心区,但结构相对简单一些,为直隧道。该隧道限速 80 km/h,总长度为 2.6 km,隧道断面面积为 43.40 m²,为双洞单向双车道的越江隧道,其纵断面呈“V”型。相关实测条件及实测方法参考文献[8]。

1.2 数据分析方法

1.2.1 交通风速计算模型(直隧道)

对于直隧道,当机动车连续不断地驶入隧道并处于较稳定的运行状态时,隧道内空气流动可视为稳定流动,交通通风力可按式(1)计算^[5]。

$$\Delta P_t = n \frac{A_m \rho}{2A_r} (V_t - V_r)^2 \quad (1)$$

式中: ΔP_t 为交通通风力, N/m²; ρ 为隧道内空气密度, kg/m³; n 为隧道内车辆数; A_m 为汽车等效阻抗面积, m²; A_r 为隧道净空断面积, m²; V_t 为机动车车速, m/s; V_r 为隧道内平均交通风速, m/s。

对于直隧道,当隧道射流风机不开启,根据空气动力学原理,可认为交通通风力等于隧道通风阻力^[5],进而可以推导得到 V_r 与 V_t 的关系(见式(2))。

$$V_r = \frac{V_t}{1 + \sqrt{\frac{(\sum \xi + \lambda \frac{L}{D})}{\frac{NL}{3600V_t} \times \frac{A_m}{A_r}}}} \quad (2)$$

式中; λ 为隧道壁面摩擦系数,可取值 0.025; L 为隧道长度, m; D 为隧道当量直径, m; N 为交通流量, 辆/h; $\sum \xi$ 为隧道总的局部阻力损失系数,直隧道包括入口和出口的局部阻力系数,取值 1.5。

本研究通过实测方法测得直隧道交通流量和平均车速后带入式(2)可知直隧道交通风速。

对于分岔隧道,综合考虑主隧道内各段交通流量的变化、匝道携入空气量和排出污染物质等影响因素,交通风速沿程将发生变化,本研究通过实测方法获得。

1.2.2 稀释污染物需风量计算方法

若已知隧道长度、交通流量、机动车污染物排放量及其控制限值,根据世界道路协会(PIARC)2012 报告^[9],可分段计算稀释污染物的需风量(V , m³/h),如式(3)所示。

$$V = \frac{N \times L}{3.6V_t} \times Q \times \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}} \quad (3)$$

式中: Q 为污染物排放量, g/(h·辆); C_{adm} 为污染物质量浓度限值, mg/m³; C_{amb} 为背景质量浓度, mg/m³。

机动车污染物排放量一方面受其自身排放特性影响,同时还与当地执行的机动车排放标准密切相关,因此有必要对式(3)中 Q 进行修正,如式(4)^{[9]23}所示。

$$Q=q(V_t, i) \times f_h \times f_t \times f_e \quad (4)$$

式中: $q(V_t, i)$ 为单车基准排放因子, $g/(h \cdot \text{辆})$; i 为隧道坡度,%; f_h 为海拔因子; f_t 为时间因子; f_e 为其他相关因子。

2 结果与讨论

2.1 交通特征

2.1.1 长沙隧道交通特征

由于长沙隧道对大型货车有限制,轻型汽油车车型比例高达97.3%;合流后主隧道每车道平均交通流量为1394辆/h,合流后主隧道每条车道最大交通流量约为1560辆/h,对应的机动车车速约为33.6 km/h,该结果低于PIARC 2012报告关于公路隧道每车道的1800辆/h(对应的机动车车速为60 km/h)的结果;另外,交通流量与车速成二次方关系(见图1),且交通流量对应车速与交通状况相关。与一般公路隧道的规律类似^[10];早晚高峰时段隧道多处于拥堵状况。

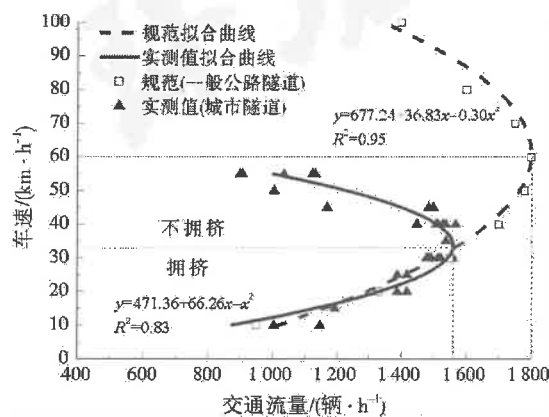


图1 交通流量与车速关系

Fig.1 Variation of traffic flow with vehicle speed

2.1.2 上海隧道交通特征

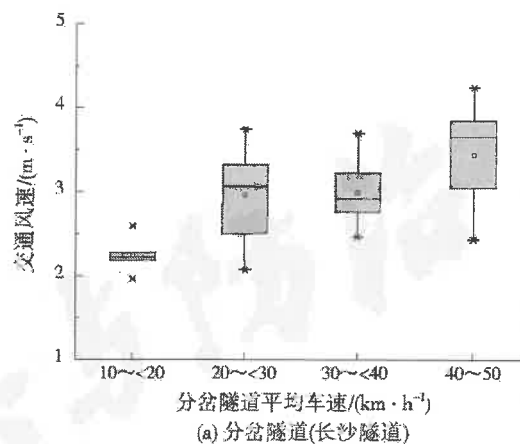
上海隧道交通特征明显受交通流量、最大限速及隧道出口附近交通信号灯等因素的影响,轻型汽油车车型比例高达91.7%;每车道平均交通流量为1400辆/h,平均机动车车速约为41 km/h;高峰时段隧道内交通状况正常。

2.2 平均车速与交通风速

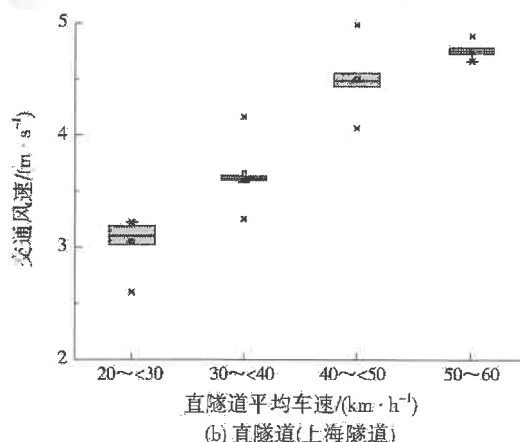
2.2.1 长沙隧道平均车速与交通风速

长沙隧道结构复杂,南线各有两个进口和两个出口,由于各出、入匝道交通流量和平均车速各不相

同,其交通风速分布规律与一般直隧道有所不同。由图2(a)可见,该隧道的主隧道交通风速随平均车速提高而增大,且当平均车速为10~50 km/h时,主隧道的交通风速约为2.24~3.44 m/s;另外,由图3可见,主隧道各段(合流前、平直段、分流后)内交通风速为2.46~3.00 m/s,合流匝道和分流匝道内的交通风速分别为1.37、1.08 m/s。由于主隧道交通流量大,主隧道各段内交通风速普遍大于匝道内的



(a) 分岔隧道(长沙隧道)



(b) 直隧道(上海隧道)

图2 主隧道平均车速与交通风速关系

Fig.2 Variation of air velocity with vehicle speed in two tunnels

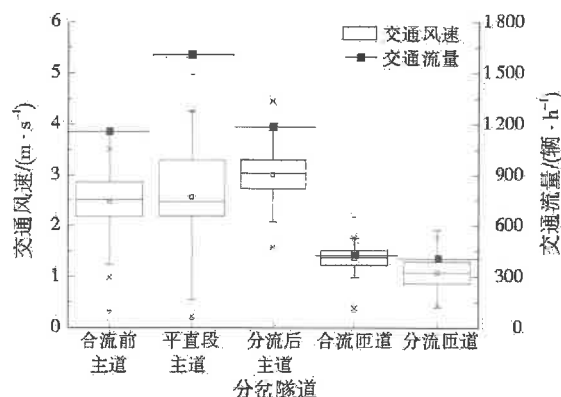


图3 分岔隧道(长沙隧道)各段交通风速和交通流量
Fig.3 Air velocity and traffic flow for each segment in bifurcation tunnel

交通风速。合流前主隧道交通流量是合流匝道的2.6倍,分流后主隧道交通流量是分流匝道的2.8倍。平直段(合流)交通流量大,实测平均车速在20~30 km/h,交通状况相对拥挤;分流后上坡段交通流量减少,实测平均车速40~50 km/h,交通状况相对畅通,由于车速越大对应交通风速越大,所以上坡段(分流后)的风速比平直段(合流)的风速大。

2.2.2 上海隧道平均车速与交通风速

受现场实测条件限制,上海隧道内的交通风速是将相应的实测数据代入式(2)推算得到。推算结果表明,上海隧道交通风速随平均车速的提高而增大,且当平均车速为20~60 km/h时,可产生的交通风速约为3.06~4.76 m/s(见图2(b))。

上述实测结果表明,分岔隧道和直隧道虽都呈现了交通风速随平均车速增加而增大的规律;但分岔隧道(长沙隧道)受平均车速较低、隧道总的局部阻力损失(包括合流段和分流段局部阻力损失)较直隧道(上海隧道)更大等因素的影响,分岔隧道的交通风速小于直隧道的交通风速。

2.3 交通风对污染物扩散特性的影响

图4为长沙隧道和上海隧道高峰时段沿机动车行驶方向CO质量浓度分布实测结果。

2.3.1 长沙隧道污染物扩散特性

长沙隧道沿行驶方向机动车先后经历了下坡段、平直段和上坡段的行驶过程,该过程中,交通流量呈现合流后明显增大而分流后减小的规律。在交通流量、合流匝道带入风量和分流匝道带出污染物综合作用下,分流后主隧道污染物浓度变化率比直隧道小,主隧道出口处的CO质量浓度平均值为22.8 mg/m³,其值略高于直隧道,这是因为分流前主隧道交通流量较直隧道大。下坡段由于交通流量和机动车单车排放因子都相对较小,因此在交通风量作用下污染物的浓度变化率也较小;另外,合流匝道交通流量与主隧道交通流量汇合,平直段机动车污染物排放量虽然容易聚集,但是受合流匝道带入交通风量的稀释作用,主隧道污染物浓度增长较缓;上坡段虽然机动车单车排放因子大,但交通流量减小,加之受交通流量和分流匝道分流的综合作用影响,上坡段的污染物浓度增长率也较小。

2.3.2 上海隧道污染物扩散特性

上海隧道沿行驶方向(东西向)机动车先后经历了下坡段和上坡段的行驶过程。正常交通状况下,隧道出口处CO质量浓度平均值约为22.3 mg/m³。

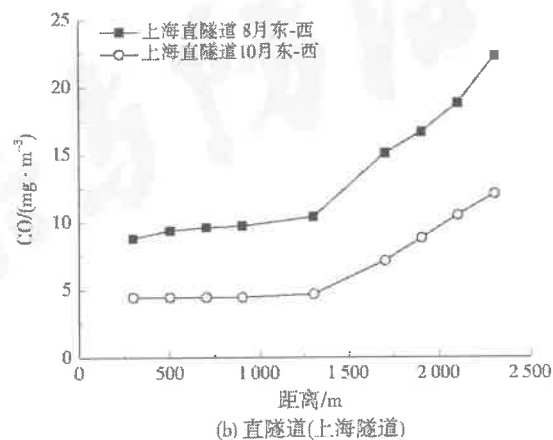
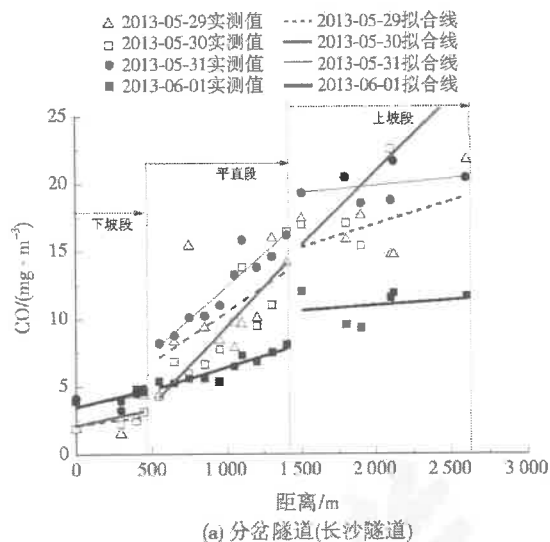


图4 CO质量浓度分布比较

Fig.4 CO concentration distribution in two tunnels

下坡段由于机动车单车排放因子相对较小,受交通通风力作用,污染物的浓度变化率较小;上坡段机动车单车排放因子大,污染物排放量容易聚集,交通通风力作用有限,致使上坡段污染物浓度累积增长明显。NO浓度变化趋势与CO相同,本研究不再详细分析NO浓度分布。

2.4 交通风对需风量的贡献

当隧道内污染物浓度水平超出控制标准限值时需要通风稀释。直隧道稀释污染物的需风量可根据PIARC 2012 报告的计算方法(见式(3))计算。分岔隧道目前尚没有相关的标准或规范可参考,本研究综合考虑交通流量的变化、交通风速的变化、匝道携入空气量和排出污染物质等影响因素,认为可根据分岔隧道运营状况,分段计算分岔隧道稀释污染物的需风量;分岔隧道主隧道总的需风量可考虑为主隧道各段需风量与合流匝道需风量之和。

结合长沙隧道和上海隧道关于交通流量和交通风速的实测数据以及PIARC 2012 报告给出的中国

2007年机动车排放因子,根据式(2)至式(4)即可分别计算得到两条隧道不同车速下的交通风量、分段CO和NO_x需风量。其中,CO质量浓度控制限值按56.0 mg/m³取值,NO_x质量浓度控制限值按0.67 mg/m³(按NO_x中的80%为NO进行换算)取值,计算结果见图5和图6。

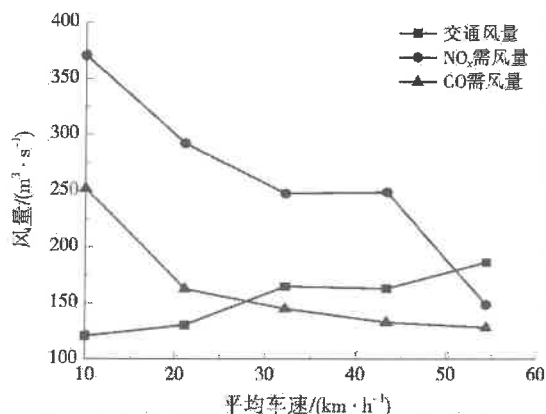


图5 长沙隧道交通风量对需风量的影响
Fig.5 Effect of traffic air flow on the requested air volume in Changsha tunnel

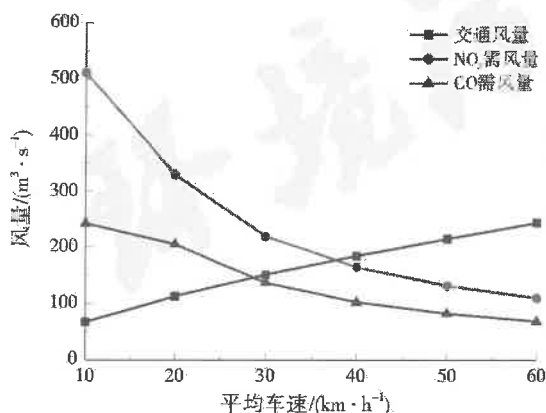


图6 上海隧道交通风量对需风量的影响
Fig.6 Effect of traffic air flow on the requested air volume in Shanghai tunnel

2.4.1 长沙隧道需风量

图5计算结果表明,交通阻滞工况时(10 km/h)控制污染物浓度的需风量最大,并且稀释NO_x的需风量大于稀释CO的,前者约为后者的1.47倍;不过此时交通风力的作用也不可忽略,仍可提供32.5%的需风量;另外,当平均车速为30 km/h时,除了主隧道交通通风量可提供66.5%需风量之外,通过合流匝道还带入了63.0 m³/s通风流量,稀释匝道带入主隧道机动车污染物NO_x需风量只有12.3 m³/s,合流匝道带入的交通风量除了稀释匝道机动车污染物外,相当于增加了20.9%的隧道总需风量,对稀释主隧道污染物浓度水平产生了积极贡献作用;同理,分流匝道可产生的49.5 m³/s交

通风量,相当于增加了16.7%隧道总需风量,有效地从主隧道内带出了污染物,也即分岔的出入口对减少主隧道的污染物浓度水平也起到了积极作用。当平均车速等于30 km/h时,交通风量、合流匝道带入风量以及分流匝道带出污染物的综合作用相当于给主隧道提供了104.1%通风量,可以较好地满足主隧道稀释污染物的需风量要求。

2.4.2 上海隧道需风量

同理,图6计算结果表明,交通阻滞工况时(10 km/h)控制污染物浓度的需风量最大,其中稀释NO_x的需风量约为CO的2.10倍,不过此时的交通风量相当于提供了11.9%的需风量;平均车速大于40 km/h(正常工况)时,形成的交通风量基本能够满足稀释污染物浓度的需风量要求。

3 结论

(1) 获得交通流量与平均车速成二次方关系,且交通流量对应车速与交通状况相关。

(2) 相同交通流量条件下,有分岔的主隧道产生的平均交通风速(2.24~3.44 m/s)虽小于直隧道的(3.06~4.76 m/s),但由于分岔匝道对污染物的分流作用,有分岔的主隧道的污染物浓度变化率低于直隧道。

(3) 当平均车速为30 km/h时,受合流匝道带入室外空气稀释作用的影响,相当于为隧道增加了20.9%的通风量,受分流匝道带出污染物的影响,相当于为隧道增加了16.7%的通风量。交通风量、合流匝道带入风量以及分流匝道带出污染物的综合作用可以较好地满足分岔隧道主隧道稀释污染物的需风量要求。

参考文献:

- [1] KATOLICY J, JICHA M. Eulerian-Lagrangian model for traffic dynamics and its impact on operational ventilation of road tunnel[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2005, 93(1): 61-77.
- [2] LEE C C, WAN T J, KUO C Y, et al. Estimating air quality in a traffic tunnel using a forecasting combination model[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2006, 112(1/2/3): 327-345.
- [3] 钟星灿, 曾臻. 自然通风公路隧道有害气体浓度分布[J]. 铁道工程学报, 2006(9): 44-49.
- [4] 张素磊. 港珠澳海底隧道通风井间距优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [5] JTG/T D70/2-02—2014, 公路隧道通风设计细则[S].
- [6] 邓顺熙. 公路与长隧道空气污染影响分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(下转第1223页)

