

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 30

# 特长隧道环境测试及通风设计参数研究

柴赫楠<sup>1</sup>, 谢静超<sup>1</sup>, 涂登凯<sup>1</sup>, 张仁<sup>2</sup>, 智艳生<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 绿色建筑环境与节能技术北京市重点实验室, 北京 100124;

2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010)

**摘要:**为探讨我国特长隧道空气环境及通风设计参数取值优化问题, 首先分析了我国机动车污染物排放统计数据, 结合文献调研, 发现我国隧道内  $\text{NO}_x$  浓度较高, 逐渐成为隧道通风最需要关注的污染物。在云南杨林特长隧道进行实测研究, 结果表明: 测试期间  $\text{NO}_2$  浓度峰值超过通风设计限值 2.1 倍, 汽油车  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}$  的排放因子分别为  $0.79 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ 、 $0.04 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$  和  $10.0 \text{ mg}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ , 柴油车  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}$  的排放因子分别为  $2.18 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ 、 $1.27 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$  和  $149 \text{ mg}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ 。与国内外隧道通风设计标准污染物排放量取值进行对比, 发现我国现行标准取值过大。依据实测排放因子计算需风量, 结果较《通风细则》2014 需风量降低超 50%, 与上海《隧道标准》2017 需风量相近, 且需风量的控制项均为  $\text{NO}_2$ 。研究结果可为我国隧道通风设计中污染物排放量取值以及需风量计算提供参考。

**关键词:**隧道通风; 隧道实测; 污染物浓度; 排放因子; 需风量

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0685-11

## Study on Environmental Testing and Ventilation Design Parameters of Extra-Long Tunnel

Chai Henan<sup>1</sup>, Xie Jingchao<sup>1</sup>, Tu Dengkai<sup>1</sup>, Zhang Ren<sup>2</sup>, Zhi Yansheng<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Green Built Environment and Energy Efficient Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China; 2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100010, P. R. China)

**Abstract:** In order to explore the optimization of air environment and ventilation design parameters in China's extra-long tunnels, this study first analyzed the statistical data of pollutant emission from motor vehicles in China, combined with literature research, and found that the concentration of  $\text{NO}_x$  in China's tunnels was relatively high, and gradually became the most concerned pollutants in tunnel ventilation. In this study, a field study was carried out in the Yanglin extra-long tunnel in Yunnan. The results show that the peak  $\text{NO}_2$  concentration exceeds the ventilation design limit by 2.1 times during the test period, and the emission factors of  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}$  of gasoline vehicles are  $0.79 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ ,  $0.04 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$  and  $10.0 \text{ mg}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ , respectively. diesel vehicles are  $2.18 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ ,  $1.27 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$  and  $149 \text{ mg}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ , respectively. Compared with the pollutant emission values of domestic and foreign tunnel ventilation design standards, it is found that the current standard values in China are too large. According to the measured emission factors, the required air volume is calculated, and the result is more than 50% lower than the required air volume in Guidelines for Design of Ventilation of Highway Tunnel, which is similar to the required air volume in Standard for the Design of Road Tunnels,

收稿日期: 2025-06-06(修改稿)

作者简介: 柴赫楠(2000—), 男, 杭州人, 硕士, 主要从事隧道污染物通风的研究工作。

E-mail: chaihnan@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 谢静超(1976—), 女, 吉林九台人, 博士, 教授, 主要从事暖通空调等领域的研究工作。

E-mail: xiejc@bjut.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3802702)

and the control item of the required air volume is  $\text{NO}_2$  concentration. The results of this study can provide reference for the calculation of pollutant emission and air demand in tunnel ventilation design in China.

**Keywords:** tunnel ventilation; tunnel measurement; pollutant concentration; emission factor; required air volume

## 0 引言

公路运输在中国运输业中占有相当重要的地位,而公路隧道作为提升公路运输效率与道路服务水平的重要基础设施,越来越受到重视和关注。据中国《2022 年交通运输行业发展统计公报》<sup>[1]</sup> 数据显示,截至 2022 年底,国家公路隧道已有 24 580 处,其中特长隧道 (> 3 km) 1 752 处,总长约 7 951 km,近十年里程年均增长率为 17%。隧道建设快速发展,数量、规模、技术不断突破。目前中国已成为世界上公路隧道规模最大、数量最多、发展速度最快的国家,其中穿越西部山区的特长公路隧道成为了新建隧道的主要类型<sup>[2]</sup>。

车辆经过隧道时不断排出  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物等污染物,随着隧道建设长度增加,司乘人员在隧道内污染空气中的暴露时间随之增加<sup>[3]</sup>。若未及时对隧道内空气进行通风稀释,特长隧道中累积的机动车排放污染物将导致隧道内的空气质量无法满足行车需求,并对驾驶员的健康和行车安全造成危害,因此,营造安全的隧道通车环境对特长隧道安全运营具有重要意义。随着科技和汽车工业的发展,机动车排放标准的持续严格,道路机动车排放水平快速降低。我国现行通风设计规范《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02-2014)<sup>[4]</sup> (以下简称《通风细则》2014) 基于 2000 年的机动车  $\text{CO}$  和  $\text{PM}$  基准排放量,以每年 2% 折减率进行递减,计算设计年份的污染物排放量,Wang<sup>[5]</sup> 等将《通风细则》2014 与《上海市工程建设规范:道路隧道设计标准》(DG TJ 08-2033-2017) (以下简称上海《隧道标准》2017)<sup>[6]</sup>、世界道路协会的 PIARC 2019 报告中时间因素对通风系统设计的影响进行对比,并依托厦门翔安海底隧道进行需风量计算对比,上海《隧道标准》2017 和世界道路协会的 PIARC 2019 报告计算结果较《通风细则》2014 更低。总之,《通风细则》2014 污染物排放量取值与实际排放水平差别较大,将导致依此设计的通风系统规模配置过大,远超实际通风稀释需求,造成资源浪费。因此,《中国公路学报》提出,进一步研究汽车污染物排放指标,解决长大公路隧道通风设计土建及机电工程规模过大的问题,必将成为未来特长公路隧道建设的重要课题<sup>[3]</sup>。

本文基于文献调研,通过隧道实测分析特长隧道空气环境质量特征,进行分车型机动车污染物排放因子分析,并在实测结果基础上对现有通风计算参数进行优化,结合需风量计算对比分析基准排放量对隧道通风系统设计影响进行讨论。

## 1 污染物排放现状

### 1.1 机动车排放总量与排放标准

《中国移动源环境管理年报》<sup>[7]</sup> 表明: $\text{CO}$  的主要排放来源为小型汽油客车, $\text{NO}_x$  的主要排放来源为重型柴油货车, $\text{PM}$  的主要排放来源为重型柴油货车和小型柴油货车。

截至 2022 年,我国机动车保有量已达 4.17 亿辆,较 2012 年的 2.24 亿辆增幅达 86%,在机动车保有量稳定增长的背景下,机动车污染物排放总量却呈现降低的趋势。根据生态环境部 2013 年至 2023 年发布的《中国移动源环境管理年报》显示,近十年来,各类污染物排放总量同步降低,如图 1 所示。自 2015 年以来呈现明显下降趋势,尤其在 2018 年前后出现断崖式下跌。截至 2022 年, $\text{CO}$  和  $\text{PM}$  排放总量分别由 2012 年的 3 472 万吨和 62.2 万吨降低至 743 万吨和 5.3 万吨,降低幅度超过 80%。污染物排放总量的降低得益于机动车排放标准的持续严格,2001 年,我国交通部发布了《轻型汽车污染物排放限值与测量方法(I)》<sup>[8]</sup>,对机动车排放  $\text{CO}$  和  $\text{PM}$  做出排放限值规定。2007 年发布的《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国 III、IV 阶段)》<sup>[9]</sup> 增加对  $\text{NO}_x$  的排放限值规定。2016 年发布的最新《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》<sup>[10]</sup> 要求自 2023 年 7 月 1 日起,所有销售和注册登记的轻型汽车应符合国 VI b 限值要求。我国各阶段汽车污染物排放标准限值如表 1 所示。从国 I 阶段标准发展到国 VI b 阶段标准,各类污染物排放限值发生极大变化, $\text{CO}$  的排放限值降低 82.6%, $\text{NO}_x$  的排放限值降低 93.0%, $\text{PM}$  的排放限值降低 98.8%。尤其在国 IV 阶段开始,相对国 III 阶段标准降低超过 50%。

### 1.2 机动车排放因子与折减率

排放标准的严格要求带来了机动车排放因子的降低。不少学者对我国机动车排放因子开展实

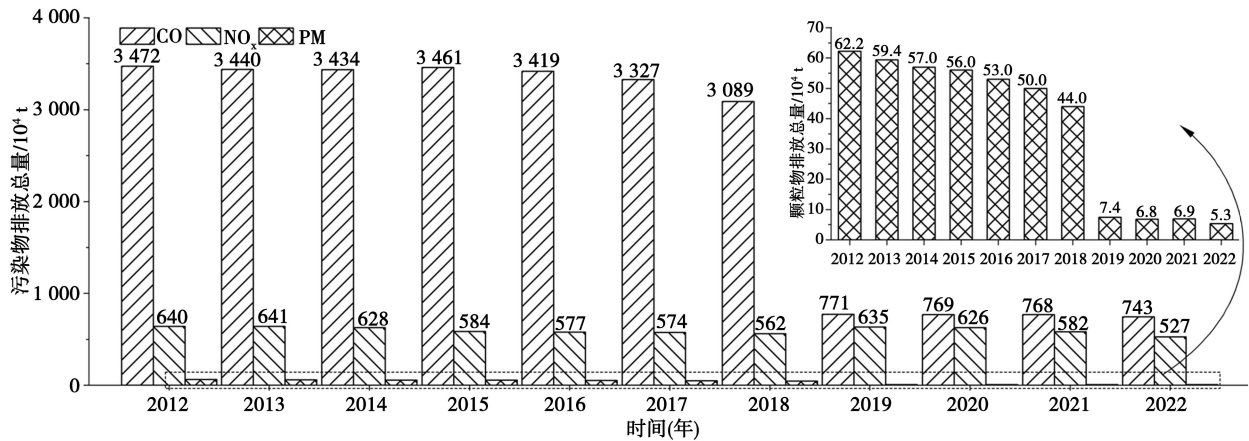


图 1 2012~2022 年全国机动车 CO、NO<sub>x</sub>、颗粒物排放量

Fig. 1 Emissions of CO, NO<sub>x</sub> and PM from motor vehicles in China from 2012 to 2022

表 1 我国各阶段汽车污染物排放限值

Table 1 Limits of automobile pollutant emission at different stages in China

| 排放阶段   | 执行年  | CO/(g·km <sup>-1</sup> ) NO <sub>x</sub> /(g·km <sup>-1</sup> ) PM/(g·km <sup>-1</sup> ) |       |         |
|--------|------|--|-------|---------|
|        |      | 点燃式  | 压燃式   | 压燃式     |
| 国 I    | 2001 | 2.72   | —     | 0.25    |
| 国 II   | 2004 | 2.2  | —     | 0.2     |
| 国 III  | 2007 | 2.3  | 0.5   | 0.1     |
| 国 IV   | 2010 | 1  | 0.25  | 0.06    |
| 国 V    | 2018 | 1  | 0.18  | 0.004 5 |
| 国 VI a | 2020 | 0.7  | 0.06  | 0.004 5 |
| 国 VI b | 2023 | 0.5  | 0.035 | 0.003   |

测研究,邓顺熙等<sup>[11]</sup>提出基于质量守恒原理计算了机动车污染物平均排放因子,建立隧道实测机动车排放因子的理论基础,并于 1996 年在西安城市隧道内测得 CO 和 NO<sub>x</sub> 排放因子分别为 33.279 g/(km·veh) 和 4.605 g/(km·veh)。2001 年,王伯光等<sup>[12]</sup>在质量守恒原理的基础上,提出应用多元回归分析法计算各类车的综合排放因子,于广州珠江隧道进行实测,得出 CO、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的平均排放因子为 15.404 g/(km·veh)、1.379 g/(km·veh) 和 0.637 g/(km·veh),并对 8 种类型机动车的排放因子进行计算。胡伟等<sup>[13]</sup>于 2008 年在南京市富贵山隧道测得 PM<sub>10</sub> 排放因子为 0.347 g/(km·veh),同样进行了各类机动车排放因子的多元线性回归分析,并与国内外隧道实验结果进行对比,发现远大于国外隧道实验结果。Li 等<sup>[14]</sup>于 2012—2013 年分别在上海延安东路隧道和翔殷路隧道测得 CO 排放因子约为 1.27~3.35 g/(km·veh) 是《通风细则》2014 阻滞工况基准设计值的 5%~40%。田鹏山等<sup>[15]</sup>于 2014 年在

西安市文昌门—和平门隧道测得 CO 排放因子为 1.097 g/(km·veh), PM<sub>2.5</sub> 排放因子为 0.016 g/(km·veh),发现与先前国内的研究相比,实验测得的机动车排放因子明显较小,表明燃料品质、发动机效率、尾气处理技术及机动车管理方面的进步对机动车尾气排放的治理有明显帮助。朱思聪等<sup>[16]</sup>于 2019 年在北京测得 PM<sub>2.5</sub> 排放因子为 0.007 g/(km·veh)。何雨璇等<sup>[17]</sup>于 2020 年在南京市富贵山隧道测得 PM<sub>2.5</sub> 的排放因子为 0.083 g/(km·veh)。诸多实测结果表明,我国机动车各类排放因子快速降低,CO 排放因子的降低速度尤为突出,而 NO<sub>x</sub> 排放因子的相关研究较少。

诸多学者对标准设置的 2% 折减率开展了相关研究。郭春等<sup>[18]</sup>通过分析欧洲各类车型排放标准,得出未来 25 年我国汽油车 CO 排放将累计下降至少 63.24%,柴油车的 CO 排放将累计下降至少 81.62%。Li 等<sup>[14]</sup>通过隧道实测测得 CO 排放因子约为《通风细则》2014 阻滞工况基准设计值的 5%~40%。唐协等<sup>[19]</sup>调查统计分析我国汽车排放数据,提出了公路隧道通风稀释汽车污染物在 2030 年计算需风量达到峰值,建议通风计算污染物基准排放量取值按国 III 标准取值。

### 1.3 隧道空气环境现状与通风控制项

污染物排放总量显示,NO<sub>x</sub> 的降低程度略小,十年来排放总量仅下降 18%。国内诸多学者对隧道内 NO<sub>x</sub> (主要是 NO<sub>2</sub>) 排放与通风稀释开展了相关研究。王亚琼<sup>[20]</sup>为了探究氮氧化物对隧道通风的影响,根据《通风规范》1999 与 PIARC 2004 报告开展了隧道污染物需风量对比计算,并结合港珠澳大桥海底隧道(6 700 m)工程案例说明隧道中的 NO<sub>2</sub> 对需风量的影响程度较大。段昕<sup>[21]</sup>基于理论分析,通过采用国际上公路隧道 NO<sub>x</sub> 浓度的标准

及计算公式(主要采用了挪威的计算方法),结合我国国情得到了  $\text{NO}_x$  浓度临界指标,提出了  $\text{NO}_x$  浓度控制方法。杨振<sup>[22]</sup>通过数值模拟得出《通风规范》1999 计算需风量结果可以满足排出 CO 和烟尘的要求,但对于  $\text{NO}_x$  的稀释效果有限。郑诗霖等<sup>[23]</sup>根据北京运通隧道的交通特征及机动车排放因子的更新预测结果对隧道内近期、中期、远期机动车排放  $\text{NO}_x$  和 CO 的水平进行预测,最不利工况及阻塞工况下  $\text{NO}_x$  需风量约为 CO 需风量的 2.1 倍。赵芮<sup>[24]</sup>依托长沙市某多点进出地下道路通风工程案例进行模拟计算,结果显示机动车排放  $\text{NO}_x$  浓度是重点控制对象,且在隧道出口段或出口处容易出现超标风险。现有研究主要通过理论分析或数值模拟的方法得出结论,稀释  $\text{NO}_2$  在隧道通风中影响较大。

许多学者对我国运营隧道内的空气质量展开现场实测, Li 等<sup>[25]</sup>对当时中国台湾雪山(Hsuehshan)隧道进行了长达 82 d 的空气质量监测,探究了无机械通风工况下,隧道内轻型车辆在行驶过程中排放带来的空气质量变化。赵琦等<sup>[26]</sup>对重庆主城区 3 座特长隧道(北碚隧道、大学城隧道、华福隧道)进行了 48 h 空气质量连续监测,结果显示隧道空气首要污染物为 NO。Liu 等<sup>[27]</sup>对深圳横龙山隧道、深港西部隧道、九尾岭隧道、大梅沙隧道 4 条典型城市道路隧道进行了为期半年的详

细现场测量,CO 浓度均远低于设计浓度。佟惠<sup>[28]</sup>在秦岭一号隧道进行为期 6 d 的机动车排放污染物测试。Wang 等<sup>[29]</sup>对厦门翔安海底隧道的交通高峰时段进行环境参数测试,结果显示 CO 浓度峰值低于隧道设计浓度, $\text{NO}_2$  和 PM 高于隧道设计浓度,并建议高交通量的城市海底公路隧道通风系统设计时应考虑稀释  $\text{NO}_2$  浓度的需风量。Luo 等<sup>[30]</sup>于秦岭三号隧道进行为期 3 d 的测试,其重型货车占比超过 65%,提出高速公路隧道通风设计应考虑隧道内  $\text{NO}_2$  的稀释。宁艳涛等<sup>[31]</sup>于青岛胶州湾海底隧道进行 CO、 $\text{PM}_{2.5}$  等污染物测试,依据测试结果分析提出 CO 应不作为隧道通风设计的控制指标,而需重点通风对颗粒物和扬尘的控制。金博强<sup>[32]</sup>对河南郑州市北三环隧道进行隧道气态污染物测试,由于隧道禁止柴油车驶入,隧道内  $\text{NO}_2$  和颗粒物浓度较低。王毅宁<sup>[33]</sup>对南京应天大街长江隧道 CO 和  $\text{PM}_{2.5}$  进行测试,其值均远低于隧道污染物设计浓度。本文主要汇总包含  $\text{NO}_2$  的特长隧道实测结果如表 2 所示。通过随国内隧道环境实测的文献调研可以发现,多数测试中 CO 浓度均远低于《通风细则》2014 中所规定的设计浓度(表 3),在部分实测中,PM 也存在超过设计浓度的情况,其值主要受隧道内柴油车流量影响。关于  $\text{NO}_2$  的实测相对较少,而相关研究大多表明  $\text{NO}_2$  浓度超过浓度限值。

表 2 国内特长隧道空气质量实测结果

Table 2 Statistics of partial measured results of air quality in extra-long tunnels in China

| 隧道名                    | 测试时间 | 地点 | 长度/m   | 污染物浓度峰值 |                    |   |
|------------------------|------|----|--------|---------|--------------------|---|
|                        |      |    |        | CO/ppm  | $\text{NO}_2$ /ppm | $\text{PM}_{2.5}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$ |
| 雪山隧道 <sup>[25]</sup>   | 2011 | 台湾 | 12 900 | 22.77   | 2.88               | —   |
| 北碚隧道 <sup>[26]</sup>   | 2011 | 重庆 | 4 000  | 7.34    | 0.843              | 0.333   |
| 大学城隧道 <sup>[26]</sup>  | 2011 | 重庆 | 5 940  | 7.56    | 1.831              | 0.687   |
| 华福隧道 <sup>[26]</sup>   | 2011 | 重庆 | 3 555  | 7.89    | 1.711              | 1.395   |
| 秦岭一号隧道 <sup>[27]</sup> | 2016 | 陕西 | 6 120  | 6.08    | 0.79               | 0.78  |
| 翔安海底隧道 <sup>[29]</sup> | 2017 | 厦门 | 6 050  | 22      | 3.73               | 1.65  |
| 秦岭三号隧道 <sup>[28]</sup> | 2017 | 陕西 | 4 683  | 16.8    | 3.37               | —   |
| 北三环隧道 <sup>[32]</sup>  | 2019 | 河南 | 4 520  | 5.9     | 0.5                | —   |

表 3 《通风细则》2014 污染物设计浓度

Table 3 Pollutant design concentration of Guidelines for Design of Ventilation of Highway Tunnel

| 污染物           | 正常行车工况设计浓度   |
|---------------|--|
| CO            | 100 ppm  |
| $\text{NO}_2$ | 1 ppm  |
| PM            | $0.007 \text{ m}^{-1} \approx 1.49 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ |

综上所述,在机动车排放标准的有效管控下,机动车 CO 和 PM 排放得到了有效控制,目前关于特长隧道内环境空气质量相关研究主要围绕 CO 展开, $\text{NO}_2$  的实测相对较少。结果表明,多数隧道在测试期间,CO 和 PM 浓度峰值基本远低于《通风细则》2014 的设计浓度,而实测  $\text{NO}_2$  浓度存在超过设计浓度的问题,稀释  $\text{NO}_2$  可能成为未来公路隧道通风重点对象。

## 2 研究方法

### 2.1 隧道实验原理

公路汽车污染物排放因子( $EF$ )定义为行驶在公路上的汽车平均单车(veh)行驶单位里程(km)排放污染物的质量(g),单位用 $g/(km \cdot veh)$ 表示。在长大公路隧道中,机动车行使过程产生的污染物和空气混合,受到隧道内部的气流作用以分子扩散、对流扩散和紊流扩散的形式不断运动。考虑隧道内运动气流为不可压缩均匀流体,且在隧道内只沿着隧道的长度方向做一维流动,污染物稳态扩散公式为:

$$K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_r \frac{\partial c}{\partial x} + q = 0 \quad (1)$$

式中: $K$ 为分子扩散系数与紊流扩散系数之和, $s^{-1}$ ;  $c$ 为隧道内污染物浓度, $g/m^3$ ;  $v_r$ 为隧道内风速, $m/s$ ;  $q$ 为隧道内污染物排放率, $g/(m^3 \cdot s)$ 。

考虑隧道内有车辆通行时,即交通通风作用下,污染物的对流扩散占主导地位,则可解出车队污染物平均排放因子为:

$$EF = \frac{c_i - c_j}{x_i - x_j} \times v_r \times \frac{A_r}{N} \quad (2)$$

式中: $N$ 为隧道内车流量,veh/s;  $A_r$ 为隧道断面积, $m^2$ ;  $c_i$ 、 $c_j$ 为隧道内*i*、*j*采样点的污染物浓度, $g/m^3$ ;  $x_i$ 、 $x_j$ 为隧道内*i*、*j*采样点距隧道入口距离,km。

根据式(2)可以计算测试期间车队的平均排放因子,为更加准确地描述各类车型的排放水平,根据隧道内实测情况,将机动车分为汽油车、柴油车和新能源车三类,不考虑新能源车带来的污染,则可通过多元线性回归的方法,获得汽油车、柴油车两类机动车的分车型排放因子:

$$EF_i = \alpha_{gas} \times EF_{gas} + \alpha_{die} \times EF_{die} + \sigma \quad (3)$$

式中: $EF_i$ 为第*i*个时间段内依据式(3)求得的车队平均排放因子, $g/(km \cdot veh)$ ;  $\alpha$ 为机动车类型占比,%;  $\sigma$ 为回归方程的误差项。

### 2.2 隧道概况

杨林隧道位于中国西部地区云南省昆明市嵩明县、宜良县境内,采用分离式隧道布设,为双洞三车道单向隧道,其中,右幅长9 420 m,坡度+1.98%。设计时速为80 km/h。设计时交通分析与预测杨林隧道柴油车比例为30%。

### 2.3 采样方法和采样仪器

于2023年6月18日至2023年6月20日在

杨林隧道右幅内部进行了为期3 d的不间断测试,由于测试隧道是坡度固定为+1.98%的直线隧道,根据相关研究,隧道内污染物浓度呈现自隧道入口处,沿程以线性变化的趋势增长,又因受隧道外部大气环境影响,入口处污染物浓度为大气背景浓度。因此,本测试将隧道中段处与隧道出口处各作为一处采样点,选择距入口、出口分别为4 782 m、4 680 m处的紧急停车带作为采样点A,同时为避免隧道出口大气影响,选择距隧道出口1 620 m的紧急停车带作为采样点B,如图2所示。测试仪器分别放置在隧道内采样点A点和B点,距离地面高度约为1.5 m,如图3所示。

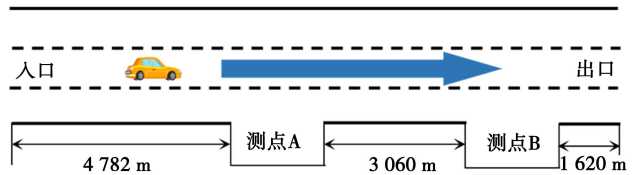


图2 采样点A、B点位置示意图

Fig. 2 Locations of sampling sites A and B



图3 采样点仪器布置

Fig. 3 Instrument lay out at the sampling site

测试参数包括隧道内空气污染物CO、NO和PM<sub>2.5</sub>浓度、风速、交通量、车速等。测试仪器详细情况总结于表4中,测试仪器能够测量的最大值和最小值之间的范围为量程,测试仪器能够分辨的最小变化量为分辨率,精度满足测试需求。污染物浓度在隧道内以1 min时间间隔连续测量,风速通过1 s测试间隔的热线风速仪测量,所有仪器在使用前都经过校准,测试同步进行。测试期间关闭隧道内风机,确保隧道内的空气流动仅由交通风力和自然风力产生。交通量和车速相关数据通过隧道内监控设备进行采集和输出。车辆类别分为汽油车(轻型客车)、柴油车(重型货车、中型货车、轻型货车、大客车)和新能源车。

表 4 测试仪器详情  
Table 4 Test instrument details

| 仪器               | 测试对象   | 量程      | 分辨率   |
|------------------|--|---------|-------|
| Testo425 热线风速仪   | 风速<br>$/(m \cdot s^{-1})$                            | 0~30    | 0.01  |
| TSIEVM-3 空气质量检测仪 | CO/ppm<br>PM <sub>2.5</sub> /<br>$(mg \cdot m^{-3})$ | 0~1 000 | 1     |
| 便携式气体分析仪         | NO/<br>$(mg \cdot m^{-3})$                           | 0~100   | 0.001 |

### 3 结果分析

#### 3.1 交通特征

机动车污染物的排放量与燃料类型、质量和行驶状况有密切关系,因此交通量、车队组成和车速都是影响隧道污染物排放量的重要因素。杨林隧道地处中国西南部山区,其交通特征(图 4)与城市公路隧道有明显区别。车流量日变化特征为日间大夜间小,但没有明显的早、晚高峰出现,且日间(7:00~17:00)交通量相对稳定,小时交通量约为 320 pcu/h,约占日交通量的 6%。测试期间没有车辆拥堵现象,车队行驶车速在 50~120 km/h 之间,平均车速为 78 km/h。车队组成中大型车比例接近 40%,轻型车约占 60%,这意味着更大比例的 NO<sub>2</sub> 与 PM 排放。

#### 3.2 污染物浓度特征

为反映污染物浓度的变化情况,将测试所得的每分钟污染物浓度数据处理为污染物的每小时平均浓度。测试期间各采样点的污染物浓度时间变化规律与车流量趋势一致,呈现昼高夜低的日周期变化规律。

CO 每小时平均浓度每小时平均变化如图 5 所示。A 采样点 CO 浓度峰值为 3.47 ppm,出现在 6

月 18 日上午 11:00 左右;B 采样点 CO 浓度峰值为 8.00 ppm,出现在 6 月 19 日 16:30 左右。《通风细则》2014 中规定的 CO 设计浓度为 100 ppm,测试期间 CO 浓度均处于安全水平。

根据世界道路协会的 PIARC 报告,通行机动车中汽油车占比约为 60%的隧道中,NO/NO<sub>2</sub> 约为 4/1,本研究采用此比例折算 NO<sub>2</sub> 浓度,如图 6 所示。其中,A 采样点 NO<sub>2</sub> 浓度峰值为 1.77 ppm,B 采样点为 2.10 ppm。测试期间部分时间段内存在 NO<sub>2</sub> 浓度严重超过设计浓度,若未及时进行通风稀释,可能对司乘人员的健康和行车安全造成威胁。

PM<sub>2.5</sub> 每小时平均浓度变化如图 7 所示,变化规律与其他污染物类似,其中 A 采样点浓度峰值为 167  $\mu g/m^3$ ,B 采样点为 416  $\mu g/m^3$ ,对比《通风细则》2014 中规定的设计浓度差距较大,处于安全范围。

实测结果显示,测试期间 CO 和 PM 均未发生浓度超过《通风细则》2014 中设计浓度的情况,而 A 采样点和 B 采样点的 NO<sub>2</sub> 浓度均存在超过设计浓度情况。由此可见,测试期间稀释 NO<sub>2</sub> 至安全浓度将是隧道通风稀释污染物需风量的控制目标。

#### 3.3 分车型排放因子

杨林隧道断面面积  $A_r$  为 97.92 m<sup>2</sup>,测试期间隧道内风速变化如图 4 所示。依据式(3)进行分车型排放因子计算,分别得到汽油车与柴油车的污染物排放因子结果。将实测污染物排放因子与国内外隧道通风相关标准中对应的排放因子进行换算对比,汽油车、柴油车结果分别如表 5 所示。

汽油车是 CO 排放的主要来源,排放量分担率超过 80%。实测汽油车 CO 排放因子为 0.79 g/(km·veh),远低于《通风细则》2014 换算值 4.95 g/(km·veh)。柴油车是 NO<sub>2</sub> 和 PM 排放的主要来源,实测柴油车 NO<sub>2</sub> 排放因子为 1.27 g/(km·veh),则更接近上海《隧道标准》2017 提

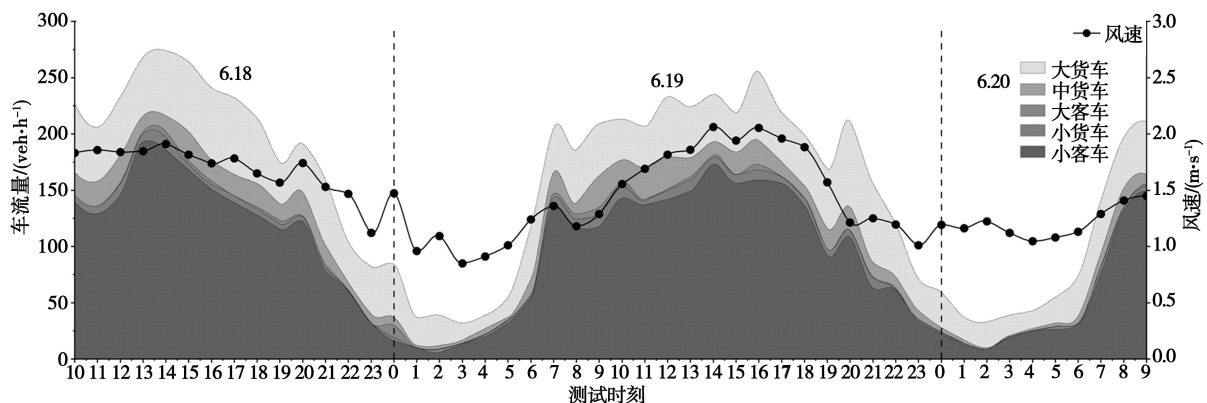


图 4 车流量与隧道内风速变化

Fig. 4 Changes of traffic flow and wind speed in tunnel

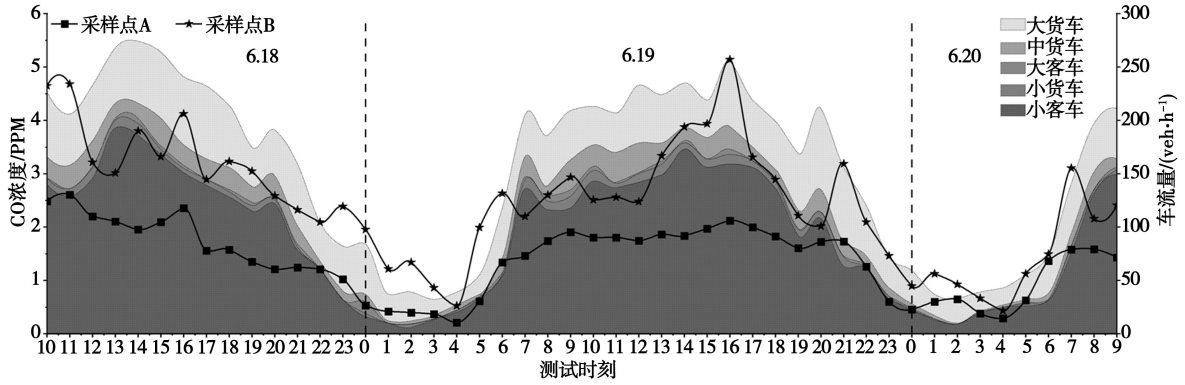


图 5 CO 每小时平均浓度变化

Fig. 5 Changes in the hourly average concentration of CO

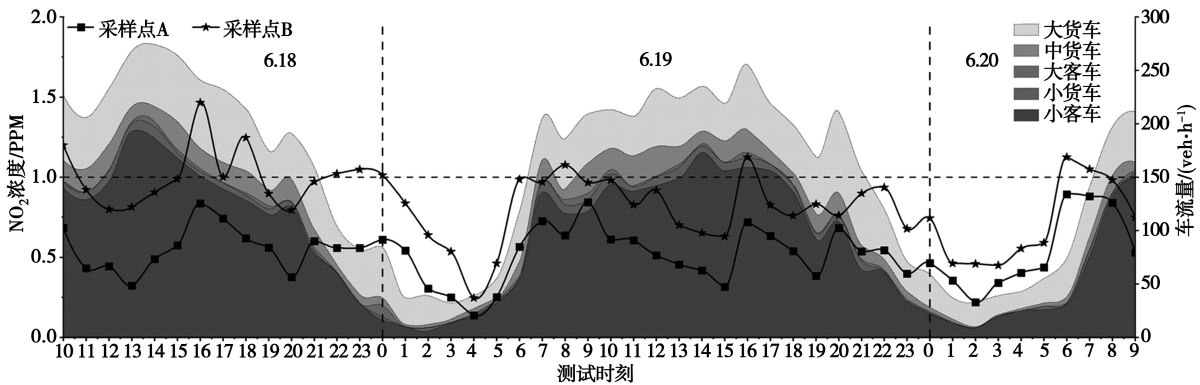


图 6 NO<sub>2</sub> 每小时平均浓度变化

Fig. 6 Changes in the hourly average concentration of NO<sub>2</sub>

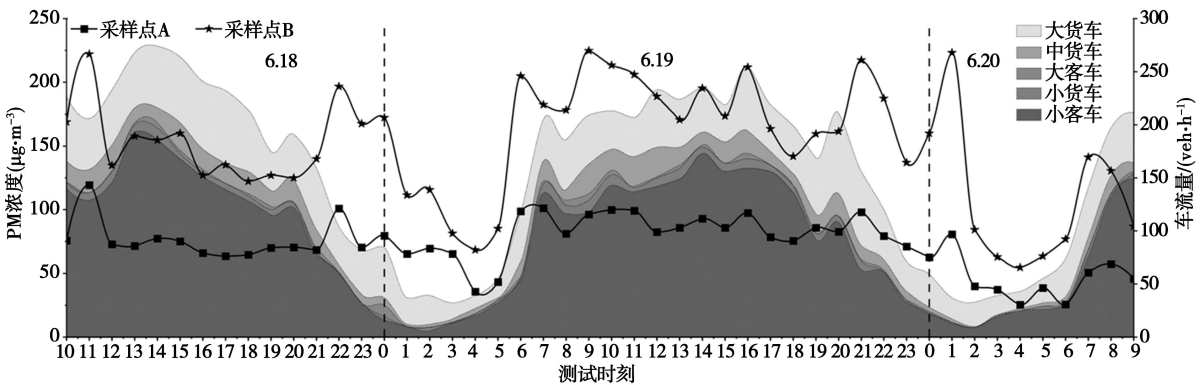


图 7 PM 每小时平均浓度变化

Fig. 7 Changes in the hourly average concentration of PM

供的数据,由于《通风细则》2014 中未提供 NO<sub>2</sub> 的相关排放因子,故无法进行对比;而柴油车 PM 的排放因子实测结果与世界道路协会的 PIARC 2019 中的数据十分接近,与《通风细则》2014 换算值差距悬殊。

《通风细则》2014 中关于 2000 年的污染物基准排放量参数取值综合参考了国内科研单位的研究成果,其值具有科学权威,但距测试时间已有 23 年,时间跨度较大,实测结果表明,采用每年递减

2%的方式计算得到的机动车排放量与实际排放水平差距较大。因此,通风设计时采用的基准排放量需进行更新,并匹配相应的折减率对未来设计时间的污染物排放量进行预测。

#### 4 需风量计算对比

为分析基准排放量与折减率取值对隧道需风量计算以及通风系统设计的影响,本文依托杨林隧道工程,分别采用实测结果、《通风细则》2014 和上海

表 5 排放因子换算对比  
Table 5 Comparison of emission factor conversion

| 80 km/h&2%<br>排放因子 | CO/(g · km <sup>-1</sup> · veh <sup>-1</sup> ) |      | NO <sub>2</sub> /(g · km <sup>-1</sup> · veh <sup>-1</sup> ) |      | PM/(mg · km <sup>-1</sup> · veh <sup>-1</sup> ) |         |
|--------------------|--|------|--|------|---|---------|
|                    | 汽油车  | 柴油车  | 汽油车  | 柴油车  | 汽油车   | 柴油车     |
| PIARC 2019         | 0.51   | 0.75 | 0.014  | 0.40 | 16.1  | 142.4   |
| 上海《隧道标准》2017       | 1.33   | 0.55 | 0.032  | 1.11 | 50.0  | 199.8   |
| 《通风细则》2014         | 4.95   | 4.95 | —  | —    | 296.8   | 1 113.0 |
| 实测结果               | 0.79   | 2.18 | 0.040  | 1.27 | 10.0  | 149.0   |

《隧道标准》2017 的相关参数进行需风量计算对比。

#### 4.1 基本信息

杨林隧道设计于 2012 年,设计时参考的依据与标准主要有:(1)《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1—1999);(2)《公路隧道设计规范》(JTJD70—2004);(3)《公路隧道通风设计细则》(JTG/TDXX—2010,送审稿)。分别考虑了 80 km/h、60 km/h、40 km/h、30 km/h 行车工况下稀释 CO 和 PM 的需风量。其污染物设计浓度与

交通量分别如表 6、表 7 所示。

表 6 杨林隧道通风污染物设计浓度

Table 6 Design concentration of ventilation pollutants in Yanglin tunnel

| 污染物                | 正常行车<br>速度/(km · h <sup>-1</sup> ) |         |       | 交通阻滞<br>速度/(km · h <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|------------------------------------|---------|-------|------------------------------------|
|                    | 80                                 | 60      | 40    | 30                                 |
| CO/ppm             | 100                                | 100     | 100   | 150                                |
| PM/m <sup>-1</sup> | 0.007                              | 0.007 5 | 0.009 | 0.012                              |

表 7 杨林隧道预测交通量和交通组成

Table 7 Predicted traffic volume and traffic composition of Yanglin tunnel

| 设计年限   | 高峰小时交通量/(pcu · h <sup>-1</sup> ) | 小货     | 中货(汽) | 中货(柴) | 大货     | 特大货   | 集装箱   | 小客     | 大客    |
|--------|----------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| 2023 年 | 1 661                            | 13.50% | 4.70% | 4.70% | 12.20% | 4.10% | 2.70% | 52.80% | 5.30% |

#### 4.2 需风量计算方法

隧道污染物通风稀释需风量可按式(4)计算:

$$Q = q_{\text{基准}} \times T \times \frac{f_{\text{iv}} \cdot (f_{\text{a}} \cdot f_{\text{h}} \cdot f_{\text{d}}) \cdot (L \cdot \sum N_{\text{m}} \cdot f_{\text{m}})}{\delta} \quad (4)$$

式中:  $Q$  为隧道需风量;  $q_{\text{基准}}$  为标准所设置基准年的机动车尾气排放有害气体中某种污染物的基准排放量;  $T$  为标准所设置的折减率取值;  $f_{\text{iv}}$  为纵坡一车速系数;  $f_{\text{a}}$  为车况系数;  $f_{\text{h}}$  为海拔高度系数;  $f_{\text{d}}$  为车密度系数;  $L$  为隧道长度;  $N_{\text{m}}$  为相应车型的交通量;  $f_{\text{m}}$  为车型系数;  $n$  为车型类别总数;  $\delta$  为污染物浓度设计限值。

可以发现,在隧道通风计算中,依据基准排放量和折减率计算所得的设计年份的机动车排放量对隧道的需风量计算其决定作用。为对比分析基准排放量与折减率(年度修正因子)取值对需风量的影响,基于《通风细则》2014、上海《隧道标准》2017 以及实测结果中的排放量、折减率取值,通过以下 3 种计算方法对杨林隧道 2023 年设计需风量进行计算:

方法①:基准排放量和折减率均取自杨林隧道设计文件取值(和《通风细则》2014 取值一致)。

方法②:基准排放量取本文于 2023 年在杨林隧道的机动车排放因子实测结果,由于计算年份即为 2023 年,因此折减率取值为 1。

方法③:基准排放量和折减率均取自上海《隧道标准》2017。

为体现 3 种计算方法污染物基准排放量与折减率的取值差异,将相关设计参数分别列于表 8、表 9 中。可见,《通风细则》2014 的基准年为 2000 年,距今已有极大的时间跨度,上海《隧道标准》2017 的基准年距今更近,其基准排放量取值也较《通风细则》2014 更小,但折减率取值也更小,这意味着在上海《隧道标准》2017 中,考虑了机动车排放水平更快的降低速度、更大的降低程度。

#### 4.3 需风量计算结果

前文说明,稀释 NO<sub>2</sub> 在隧道中通风中存在必要性,尤其在柴油车占比较高的隧道中,稀释 NO<sub>2</sub> 需风量可能成为隧道需风量的控制工况。通车工况下各污染物的需风量如图 8 所示。由于方法①中缺少的 NO<sub>2</sub> 基准排放量,无法进行需风量计算,其计算需风量控制污染物为 PM。而方法②、③的控制污染物均为 NO<sub>2</sub>,且较超出稀释 CO 和 PM 所需风量多倍,印证了实测期间隧道内仅有 NO<sub>2</sub> 污

表 8 各污染物基准排放量取值  
Table 8 Values of the baseline emissions of each pollutant

| 污染物  | 基准年 | 80/(km·h <sup>-1</sup> ) | 60/(km·h <sup>-1</sup> ) | 40/(km·h <sup>-1</sup> ) | 30/(km·h <sup>-1</sup> ) |
|--|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| CO/g·km <sup>-1</sup> ·veh <sup>-1</sup>               | 方法① | 2000                     | 10.5                     | 8.75                     | 8.75                     |
|  | 方法② | 2023                     | 0.79                     | 0.66                     | 0.66                     |
|  | 方法③ | 2010                     | 1.71                     | 1.63                     | 1.79                     |
| NO <sub>2</sub> /g·km <sup>-1</sup> ·veh <sup>-1</sup> | 方法① | 2000                     | —                        | —                        | —                        |
|  | 方法② | 2023                     | 1.27                     | 0.76                     | 0.50                     |
|  | 方法③ | 2010                     | 1.54                     | 1.56                     | 1.65                     |
| PM/m <sup>2</sup> ·km <sup>-1</sup> ·veh <sup>-1</sup> | 方法① | 2000                     | 7.40                     | 4.40                     | 2.90                     |
|  | 方法② | 2023                     | 0.70                     | 0.42                     | 0.27                     |
|  | 方法③ | 2010                     | 0.83                     | 0.51                     | 0.26                     |

表 9 各污染物折减率(年度修正因子)取值  
Table 9 Value of each pollutant reduction rate (annual correction factor)

| 污染物             | 起始年 | 间隔年  | 设计年(2023) |      |
|-----------------|-----|------|-----------|------|
| CO              | 方法① | 2000 | 23        | 0.63 |
|                 | 方法② | 2023 | 0         | 1.00 |
|                 | 方法③ | 2010 | 13        | 0.52 |
| NO <sub>2</sub> | 方法① | 2000 | 23        | —    |
|                 | 方法② | 2023 | 0         | 1.00 |
|                 | 方法③ | 2010 | 13        | 0.37 |
| PM              | 方法① | 2000 | 23        | 0.63 |
|                 | 方法② | 2023 | 0         | 1.00 |
|                 | 方法③ | 2010 | 13        | 0.23 |

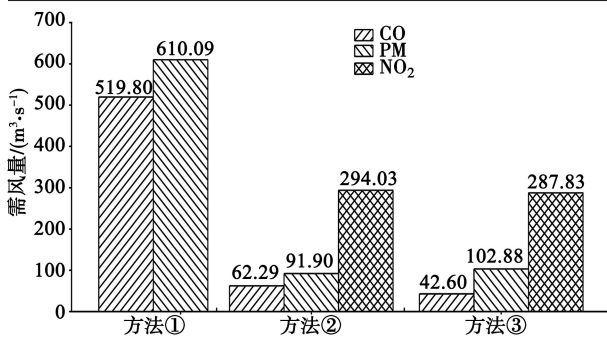


图 8 杨林隧道 2023 年需风量计算结果对比

Fig. 8 Comparison of calculation results of required air volume of Yanglin tunnel in 2023

染物浓度超过通风设计限值的情况。

方法②相比于方法①,基于杨林隧道的实测结果更新了 CO、PM 以及 NO<sub>2</sub> 的基准排放量,比较需风量计算结果,方法②的 CO 和 PM 的需风量相比方法①分别下降 88%和 85%。方法②确定需风量

为以稀释 NO<sub>2</sub> 为控制项。由于方法①中的基准排放量是基于 2000 年的机动车污染物排放因子进行设置的,距离实测时间 2023 年跨度过大,显然依据实测的排放量进行需风量计算更符合隧道内空气稀释的需求,同时证明了依据《通风细则》2014 进行未来需风量的计算将造成更大的资源浪费。

方法③采用了上海《隧道标准》2017 中的污染物基准排放因子和年度修正因子(即折减率),方法②与方法③的需风量计算结果十分接近,可以认为计算上海《隧道标准》2017 结果较《通风细则》2014 更符合实际情况。

综上所述,通过对比不同基准排放量与折减率(年度修正因子)取值方法的需风量计算结果,由于方法①所采用基准排放量与折减率取值无法匹配机动车排放现状,并且,方法①忽视了 NO<sub>2</sub> 在隧道通风稀释中的重要性,因此计算结果与方法②、③计算所得差距悬殊,远超隧道通风实际需求,无法体现隧道内空气质量现状,将造成巨大的通风系统资源浪费。

## 5 结论

(1)对机动车污染物排放总量数据进行分析,发现我国机动车排放 CO 和 PM 已有极大改善,而 NO<sub>x</sub> 排放总量居高不下,经调研实测文献,多数进行了 NO<sub>2</sub> 测试的隧道内存在 NO<sub>2</sub> 浓度超过设计限值的情况,因此,隧道通风稀释 NO<sub>2</sub> 存在必要性。

(2)以杨林隧道为测试对象,发现空气中 CO 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度始终处于安全范围,仅 NO<sub>2</sub> 污染物浓度存在超过标准设计限值 2.1 倍的情况,对隧道运营安全构成威胁。

(3)通过多元线性回归的方法进行测试期间分车型排放因子计算,得到汽油车 CO、NO<sub>2</sub> 和 PM

的排放因子分别为  $0.79 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ 、 $0.04 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$  和  $10.0 \text{ mg}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ , 柴油车  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}$  的排放因子分别为  $2.18 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ 、 $1.27 \text{ g}/(\text{km} \cdot \text{veh})$  和  $149 \text{ mg}/(\text{km} \cdot \text{veh})$ 。与国内标准进行对比, 实测排放因子远低于我国现行《通风细则》2014 中计算所得的机动车排放因子。

(4) 依据实测机动车排放量计算需风量与上海《隧道标准》2017 均得出以  $\text{NO}_2$  作为需风量的控制项, 且结果十分接近, 较《通风细则》2014 减少超过 50%, 意味着按照《通风细则》2014 的基准排放量与折减率取值设计的通风系统将产生巨大冗余与资源消耗。

#### 参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2022 年中国交通运输行业发展统计公报. [R]. <https://xxgk.mot.gov.cn/>. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. China's transportation industry development statistical bulletin in 2022. [R]. (in Chinese))
- [2] 洪开荣, 冯欢欢. 中国公路隧道近 10 年的发展趋势与思考[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 62-76. (Hong Kairong, Feng Huanhuan. Development trend and thinking of Highway tunnel in China in Recent 10 years [J]. China Journal of Highway and Transportation, 20, 33(12): 62-76. (in Chinese))
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022 [J]. 中国公路学报, 2020, 35(4): 1-40. (Editorial Department of China Highway Journal. Review of academic research on Traffic tunnel Engineering in China · 2022 [J]. China Journal of Highway and Transportation, 20, 35(4): 1-40. (in Chinese))
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道通风设计细则 (JTG/T D70/2-02—2014) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design Rules for Highway Tunnel ventilation (JTG/T D70/2-02-2014) [S]. Beijing: People's Communications Press, 2014. (in Chinese))
- [5] Wang X, Wang M N, Jia C, et al. Analysis of calculation of fresh-air demand for road tunnel ventilation design in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020(103): 103469.
- [6] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 道路隧道设计标准 (DG/TJ 08-2033-2017) [S]. 上海: 同济大学出版社, 2017. (Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Construction Administration. Road Tunnel design Standard (DG/TJ 08-2033-2017) [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2017. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 2023 年中国移动源环境管理年报 [R]. <http://www.mee.gov.cn/>. 2021. (Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China Mobile Source Environmental Management Annual Report 2023. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家环境保护总局. 轻型汽车污染物排放限值与测量方法 (I) (GB18352. 1-2001) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2001. (State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Emission limits and measurement methods for Light vehicle Pollutants (I) (GB18352. 1-2001) [S]. Beijing: China Environmental Press, 2001. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国国家环境保护总局. 轻型汽车污染物排放限值与测量方法 (中国 III、IV 阶段) (GB18352. 3-2005) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2005. (State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Emission Limits and Measurement Methods for Light Vehicle Pollutants (China Stage III and IV) (GB18352. 3-2005) [S]. Beijing: China Environmental Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值与测量方法 (中国第六阶段): (GB18352. 6-2016) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2016. (Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Emission Limits and Measurement Methods for Light Vehicle Pollutants (China Sixth stage): (GB18352. 6-2016) [S]. Beijing: China Environment Press, 2016. (in Chinese))
- [11] 邓顺熙, 成平, 朱唯. 用隧道确定高速公路汽车  $\text{CO}$ 、 $\text{THC}$  和  $\text{NO}_x$  排放因子 [J]. 环境科学研究, 2000, 2: 32-35. (Deng Shunxi, Cheng Ping, Zhu Wei. Determination of  $\text{CO}$ ,  $\text{THC}$  and  $\text{NO}_x$  emission factors of expressway vehicles by tunnel [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 2: 32-35. (in Chinese))
- [12] 王伯光, 张远航, 祝昌健, 等. 城市机动车排放因子隧道试验研究 [J]. 环境科学, 2001, 2: 55-59. (Wang Boguang, Zhang Yuan-hang, Zhu Chang-Jian, et al. Experimental study on urban vehicle emission factor tunnel [J]. Environmental Science, 2001, 2: 55-59. (in Chinese))
- [13] 胡伟, 钟秦. 隧道实验测定南京市机动车  $\text{PM}_{10}$  排放因子 [J]. 环境工程学报, 2009, 3(10): 1852-1855. (Hu Wei, Zhong Qin. Measurement of vehicle  $\text{PM}_{10}$  emission factor in Nanjing by tunnel experiment [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(10): 1852-1855. (in Chinese))
- [14] Li Q, Chen C, Deng Y W, et al. Influence of traffic force on pollutant dispersion of  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  and particle matter ( $\text{PM}_{2.5}$ ) measured in an urban tunnel in Changsha, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45: 400-407.
- [15] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 机动车排放因子的隧道测试——以西安市为例 [J]. 科技导报, 2015, 33(6): 59-63. (Tian Pengshan, Cao Junji, Han

- Yongming, et al. Tunnel testing of vehicle emission factors: A case study of Xi'an City [J]. Science and Technology Review, 2015, 33 (6): 59-63. (in Chinese))
- [16] 朱思聪,孙玉龙,喻东晓,等. 基于隧道测试法的分车型车辆来源PM<sub>2.5</sub>排放研究[J]. 公路, 2021, 66(10): 390-397. (Zhu Sicong, Sun Yulong, Yu Dongxiao, et al. Study on PM<sub>2.5</sub> emission from vehicle source by vehicle type based on tunnel test method [J]. Highway, 2021, 66(10): 390-397. (in Chinese))
- [17] 何雨璇,常运华,张和艳,等. 基于隧道PM<sub>2.5</sub>取样研究南京市机动车尾气颗粒物排放特征[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4430-4438. (He Yuxuan, Chang Yunhua, Zhang Heyan, et al. Study on particulate matter emission characteristics of vehicle exhaust in Nanjing City based on tunnel PM<sub>2.5</sub> sampling [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 41(11): 4430-4438. (in Chinese))
- [18] 郭春,王明年,李玉文,等. 公路隧道通风CO、烟雾基准排放量折减率研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(10): 106-109. (Guo Chun, Wang Yingnian, Li Yuwen, et al. Study on the reduction rate of CO and Smog baseline emissions from Highway tunnel ventilation [J]. Highway Transportation Science and Technology, 2008, 25(10): 106-109. (in Chinese))
- [19] 唐协,林国进,何佳,等. 公路隧道通风汽车污染物基准排放取值探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2023(19): 1720-1729. (Tang Xie, Lin Guojin, He Jia, et al. Discussion on benchmark emission of automobile pollutants in highway tunnel ventilation [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2023(19): 1720-1729. (in Chinese))
- [20] 王亚琼,谢永利,张素磊,等. 氮氧化物对隧道需风量影响研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10): 89-94. (Wang Yaqiong, Xie Yongli, Zhang Sulei, et al. Effect of nitrogen oxides on air demand in tunnel [J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2010, 27(10): 89-94. (in Chinese))
- [21] 段昕. 公路隧道氮氧化物浓度安全指标研究及控制[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012. (Duan Xin. Research and control on safety index of nitrogen oxide concentration in highway tunnel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [22] 杨振. 特长公路隧道通风的需风量研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013. (Yang Zhen. Study on air demand of ventilation in Long highway tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese))
- [23] 郑诗霖,李琼,陈纬,等. 北京运通隧道污染物排放特性与需风量预测分析[J]. 华北科技学院学报, 2022(19): 68-73. (Zheng Shilin, Li Qiong, Chen Wei, et al. Pollutant emission characteristics and air demand prediction analysis of Beijing Express Tunnel [J]. Journal of North China University of Science and Technology, 2022(19): 68-73. (in Chinese))
- [24] 赵芮. 基于污染物浓度控制多点进出城市地下道路纵向通风系统运行策略研究[D]. 北京:北京工业大学, 2023. (Zhao Rui. Study on operation strategy of longitudinal ventilation system for multi-point access to urban underground road based on pollutant concentration [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023. (in Chinese))
- [25] Li H C, Chen K S, Lai C H, et al. Measurements of gaseous pollutant concentrations in the Hsuehshan Traffic Tunnel of Northern Taiwan [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011(11): 776-782.
- [26] 赵琦,许君,余家燕,等. 特长隧道空气质量的调查研究[J]. 三峡环境与生态, 2011(33): 13-17. (Zhao Qi, Xu Jun, Yu Jiayan, et al. Investigation on air quality in long tunnel [J]. Environment and Ecology of the Three Gorges, 2011(33): 13-17. (in Chinese))
- [27] Liu W W, Chen J X, Luo Y B, et al. Study on the Annual Reduction Rate of Vehicle Emission Factors for Carbon Monoxide: A Case Study of Urban Road Tunnels in Shenzhen, China [J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-17.
- [28] 佟惠. 机动车污染物排放特性及其排放因子的隧道测试研究[D]. 西安:长安大学, 2018. (Tong Hui. Research on vehicle pollutant emission characteristics and Emission Factors in tunnel testing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese))
- [29] Wang M N, Wang X, Li Y, et al. Field measurements of the environmental parameter and pollutant dispersion in urban undersea road tunnel [J]. Building and Environment, 2019, 149: 100-108.
- [30] Luo Y B, Chen J X, Liu W W, et al. Pollutant concentration measurement and emission factor analysis of highway tunnel with mainly HGVs in mountainous area [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020(106): 103591.
- [31] 宁艳涛,贺肖杰. 青岛胶州湾海底公路隧道污染物浓度水平测试[J]. 建筑热能通风空调, 2020(39): 72-75. (Ning Yantao, He Xiaojie. Test of pollutant concentration level in Jiaozhou Bay undersea Highway tunnel in Qingdao [J]. Building Heat, Ventilation and Air Conditioning, 2020(39): 72-75. (in Chinese))
- [32] 金博强. 基于隧道实验的郑州市机动车气态污染物排放特征研究[D]. 郑州:郑州大学, 2021. (Jin Boqiang. Study on emission characteristics of gaseous pollutants from motor vehicles in Zhengzhou City based on tunnel experiment [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese))
- [33] 王毅宁. 基于机动车污染物排放特性的特长隧道需风量研究[D]. 北京:北京工业大学, 2023. (Wang Yining. Research on air demand in Long tunnel based on vehicle pollutant emission Characteristics [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023. (in Chinese))