王 鑫,邱兆文,李 城,等.考虑新能源汽车基准排放的隧道通风计算方法 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4207-4215.
Wang X, Qiu Z W, Li C, et al. Tunnel ventilation methods based on baseline emission factors for new energy vehicles [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4207-4215.

考虑新能源汽车基准排放的隧道通风计算方法

王 鑫[1],邱兆文[1*],李 城[1],陈建勋[2**],刘伟伟[2],罗彦斌[2](1.长安大学汽车学院,陕西 西安 710018;2.长安大学公路学院,陕西 西安 710018)

摘要：为探究液化天然气(LNG)重型车、混合动力汽车等新能源车辆的增加对公路隧道通风的影响,并解决现行设计规范因未充分考虑其排放特性而导致需风量计算偏差的问题,基于新能源汽车排放特性,考虑坡度、车队构成等因素更新了隧道车辆基准排放因子库,并据此构建了精细化隧道通风计算方法;以华岩隧道为案例,对不同新能源汽车渗透率下的隧道需风量进行了测算.结果表明,精细化方法显著提高了需风量计算的准确性.当设计年份为2030年时,稀释NO_2的需风量较国际通风报告(PIARC 2019)方法增加305.5%,而稀释CO和VI的需风量分别减少10%和6.5%.LNG重型车渗透率每增加10%,NO_2稀释需风量增加约55%.相较之下,混合动力汽车和纯电动汽车对需风量的影响可以忽略.传统设计规范以CO和VI作为主要控制指标,已不适用于新能源车辆比例快速增长的车队结构,NO_2稀释需风量将成为未来隧道通风设计的关键控制指标.

关键词：公路隧道；基准排放；需风量计算；LNG重型车；新能源汽车
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4207-09

Tunnel ventilation methods based on baseline emission factors for new energy vehicles. WANG Xin[1], QIU Zhao-wen[1*], LI Cheng[1], CHEN Jian-xun[2**], LIU Wei-wei[2], LUO Yan-bin[2] (1. School of Automobile, Chang 'an University, Xi 'an, Shaanxi 710018; 2.School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710018). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4207~4215

Abstract：To explore the impact of the increase in new energy vehicles, such as LNG heavy-duty trucks and hybrid vehicles, on tunnel ventilation and to address the issue of ventilation flow calculation discrepancies caused by insufficient consideration of their emission characteristics in current design codes, this study builds a tunnel vehicle baseline emission factor library and a refined tunnel ventilation calculation method based on the emission characteristics of new energy vehicles. Factors such as slope and vehicle fleet composition are taken into account. The study uses the Huayan Tunnel as a case study and calculates the required ventilation flow for different penetration rates of new energy vehicles based on the updated emission factor library. The results are then compared with those obtained using the existing ventilation calculation methods. The results indicate that the refined method significantly improves the accuracy of the required ventilation flow calculation. When the design year is set to 2030, the required ventilation flow for NO_2 dilution is 305.5% higher than that calculated using the International Tunnel Ventilation Report (PIARC 2019) method, while the required ventilation flow for CO and VI dilution decreases by 10% and 6.5%, respectively. Additionally, for every 10% increase in LNG heavy-duty truck penetration, the required ventilation flow for NO_2 dilution increases by approximately 55%. In contrast, the impact of hybrid and pure electric vehicles on the required ventilation flow is negligible. The traditional design codes, which focus on CO and VI as the main control indicators, are no longer applicable to fleet structures with a rapidly increasing proportion of new energy vehicles. The required ventilation flow for NO_2 dilution will become a key control indicator for future tunnel ventilation design.

Key words：highway tunnel；baseline emissions；ventilation demand calculation；LNG heavy-duty vehicles；new energy vehicles

隧道通风设计对于保障隧道内空气质量和行车安全至关重要[1-3].现行的《公路隧道通风设计细则》(JTGT D70/2-2014,以下简称2014《细则》)[4]采用了2000年制定的汽车尾气基准排放因子,年折减率为2%,难以反映近年来车辆技术进步和排放特性的变化[5-6],导致通风系统设计过大,造成经济浪费[7-9].为应对这一问题,研究者尝试优化基准排放因子以适应车辆排放特性的变化.例如,Liu 等[10]建议将CO基准排放因子的年减少率设为4%;许昱旻等[11]修正了CO和PM的年折减率.部分研究采用机动车排放限值作为通风计算基准[5,7,12].然而,这些方法未充分考虑新能源和替代燃料车辆的发展对通

收稿日期：2024-12-28
基金项目：长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102224901)
* 责任作者, 教授, qzw@chd.edu.cn; ** 教授, chenjx1969@163.com

风设计的影响.

近年来我国电动汽车和清洁能源车辆的快速增长[13-14].电动汽车和液化天然气(LNG)车辆的普及降低了 CO 和 PM 的排放浓度,减少了隧道内污染物的稀释需求[15].现有研究对 LNG 重型车和混合动力车辆的排放特性考虑不足,可能导致需风量计算出现偏差[16-18].王亮等[17]在研究电动汽车对通风量影响时,仅关注纯电动车的非尾气排放,未考虑混合动力车.此外,NO_2 已成为隧道通风设计的关键控制指标[19-22],但 2014《细则》未予考虑.虽然世界道路协会发布的《公路隧道:车辆排放与通风需求》(PIARC 2019)[23]提供了隧道内 NO_2 的浓度限值和相应的需风量计算方法,但其基准排放因子基于欧洲车队,且未考虑混合动力车和 LNG 重型车的排放,难以直接适用于我国隧道通风设计.

针对上述不足,本研究旨在考虑新能源汽车更新基准排放因子库,提出适应我国当前车队构成和排放特性的精细化隧道通风设计方法;通过案例分析,比较多种通风计算方法,并研究不同类型新能源汽车渗透率对需风量的影响,为隧道通风设计规范的更新提供参考.

1 隧道精细化通风计算方法

1.1 通风计算方法分析

隧道需风量是根据隧道内污染物总排放量和空气质量控制标准计算得出的,如式(1)所示.

$$V=\frac{Q}{C_{\mathrm{adm}}/K_{\mathrm{adm}}-C_{\mathrm{amb}}/K_{\mathrm{amb}}} \tag{1}$$

式中:V 为稀释污染物所需风量,m^3/s;Q 为隧道沿线相关污染物的总排放率,对于气体为 g/s,对于能见度为 m^2/s;C_{adm} 为允许的质量浓度,g/m^3;C_{amb} 为环境质量浓度,g/m^3;K_{adm} 为消光系数(能见度)的允许水平,m^{-1};K_{amb} 为消光系数(能见度)的环境等级,m^{-1}.

影响隧道内污染物总排放量计算结果的最主要因素是基准排放量的取值.2014《细则》[4]和 PIARC 2019[23]通风报告中汽车排放量的计算公式分别如式(2)和式(3)所示:

$$Q=\frac{1}{3.6\times10^6}\cdot q\cdot f_h\cdot f_a\cdot f_d\cdot f_{iv}\cdot L\cdot\sum_{m=1}^{n}\left(N_m\cdot f_m\right) \tag{2}$$

式中:Q 为隧道总排放率;q 为基准排放因子;f_h 为海拔系数;f_a 为车况系数;f_d 为车密度系数;f_{iv} 为纵坡—车速系数;L 为隧道长度;f_m 为车型系数;N_m 相应车型的交通量.

$$Q=\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{cat}}}\left(g_{\mathrm{cat}}(v,i)\cdot f_h\cdot f_t\cdot f_m+g_{\text{non-ex}}\right)\cdot n_{\mathrm{veh},n} \tag{3}$$

式中:Q 为隧道总排放率;$g_{\mathrm{cat}}(v,i)$为基准排放因子;f_h 为海拔系数;f_t 为时间因子;f_m 为质量因子;$g_{\text{non-ex}}$ 为非尾气颗粒排放因子;$n_{\mathrm{veh},n}$ 隧道内某类型的车辆数.

两种方法的主要不同之处在于污染物基准排放因子的选取上.对于 PIARC 2019,$g_{\mathrm{cat}}(v,i)$集成了纵坡—车速系数.而 2014《细则》中的基准排放因子q则集成了时间因子,以 2000 年为起点,按每年 2%的递减率计算至目标年份.此外,两者基准排放因子的来源也不同. 2014《细则》在制定基准排放因子时参考了 2004PIARC 通风报告和国内科研单位成果[7];PIARC 2019 中的基础排放数据来源于《道路交通排放因子手册》(HBEFA)3.3 版本中可用的排放数据.

1.2 精细化通风计算方法

为准确反映我国车队结构和新能源汽车的快速发展趋势,本研究在 PIARC 2019 通风报告的基础上提出了一种精细化的隧道通风计算方法.该方法在计算框架上依然遵循 PIARC 2019 给定的基本公式(式(1)和式(3)),在此基础上,通过引入新能源汽车排放因子、车队分布比例及新能源汽车相关修正系数,建立了更加符合我国实际车队结构的精细化隧道通风计算方法.方法的主要内容如图 1 所示.

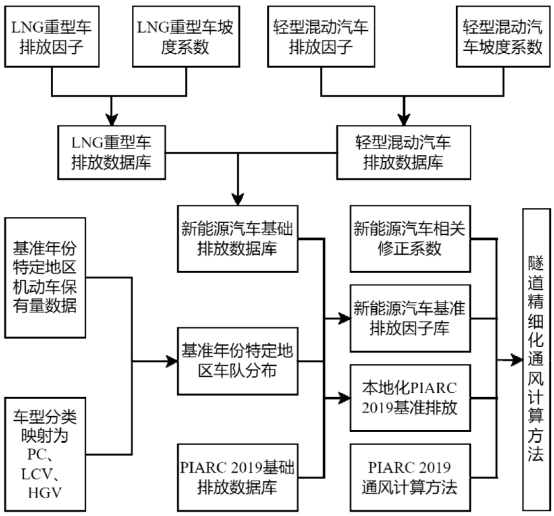


图 1 基于新能源汽车基准排放因子库的隧道精细化通风计算方法框架

Fig.1 Framework of refined tunnel ventilation calculation method based on baseline emission factor library for new energy vehicles

首先,通过文献调研和实测获取新能源车(LNG 重卡、混动车)在不同工况下的排放因子(表 1)和坡度系数(表 2);其次,结合目标地区(如西安)特定年份的机动车保有量数据和车型匹配规则(表 3),计算得到包含新能源汽车的本地化车队构成比例(表 4);再次,利用式(4)和式(5)整合新能源车排放数据、PIARC 2019 基础排放数据,和基准年份车队比例,构建更新后的基准排放因子库;同时,设定新能源汽车相关的修正系数(海拔、时间、质量等);最后,应用式(1)和式(3),结合更新后的排放因子库和修正系数,计算隧道所需通风量.相较于 PIARC 2019,精细化通风计算方法新增了新能源汽车的基准排放因子库,并对 PIARC 2019 的原有基准排放因子库进行了本地化修正.

同时对新能源汽车的相关修正系数进行了细化设定.对于海拔因子,由于目前尚缺乏关于不同车型在高海拔条件下排放特性的研究,参考 PIARC 2019 的保守设定[23].因此,2025 年及以后所有车型(包括 LNG 重型车和混合动力汽车)的海拔因子均设定为 1.对于时间因子,考虑到混合动力汽车与轻型汽油车遵循相同的排放法规,其时间因子参数取值与汽油乘用车(PC Gasoline)一致.而 LNG 重型车主要符合国Ⅴ及国Ⅵ标准,且预期在未来一段时间内仍为主流车型,因此将 2020 年的时间因子设为 1,并对 NO_2 和 PM 排放分别按每年 1%和 2%的速率递减.对于质量因子和非尾气颗粒排放因子,LNG 重型车的参数与柴油重型车一致;混合动力汽车与汽油乘用车相同.

为了满足隧道通风设计中 NO_2 的稀释需求,需要明确 NO_x 中 NO_2 的比例.综合现有文献与工程实际,对 LNG 重型车的 NO_2/NO_x 比例进行了设定.Zheng 等[24]的研究表明,LNG 重型车的 NO_2/NO_x 比例为 0.10~0.13. Wang 等[25]的研究则显示该比例在 0.16~0.39 之间波动.由于不同研究结果存在差异,本研究参考 Wang 等[25]的较高中位值,并结合隧道工程应用的保守性需求,将比例设定为 0.3.混合动力汽车则与汽油乘用车保持一致.

2　新能源汽车基准排放因子库的构建方法

为实现包含混合动力汽车和 LNG 重型车的精细化隧道通风计算,参照 PIARC 2019,构建了涵盖不同排放标准、速度及坡度条件的基准排放因子库.鉴于不同坡度条件下新能源汽车排放因子的研究相对有限,首先通过文献调研收集不同排放标准下混合动力汽车和 LNG 重型车在不同速度下的排放因子,并结合相关研究确定坡度修正系数,最终依据式(4)构建基础排放数据库.在此基础上,结合特定地区的车队分布数据,通过式(5)计算出新能源汽车基准排放库.本研究以 2020 年西安车队分布为例进行构建,其具体方法详见图 1.

$$g_{\mathrm{cat},j}(v,i)=E_v\cdot S_i\cdot v \tag{4}$$

$g_{\mathrm{cat},j}(v,i)$为符合国标 j 的某种车辆类别的基础排放率(g/h);E_v 是该类车辆在速度 v 时的排放因子(g/km);S_i 是该类车辆在坡度 i 下的修正系数.

2.1　新能源汽车排放因子

首先,根据 Zheng 等[24]的研究结果,确定了国Ⅴ标准 LNG 重型车在 0~90km/h 速度范围内的排放因子,并通过线性插值法推算出 100km/h 时的排放因子.该研究基于 9 辆国Ⅴ标准 LNG 重型车的便携式排放测试系统(PEMS)实验数据,具有较高的可靠性.王志红等[26]使用 PEMS 对国Ⅵ标准 LNG 重型半挂牵引车开展了实际道路排放试验,并提供了车速与排放量之间的拟合函数.本研究基于该函数计算了 0~100km/h 速度范围内的排放因子,以代表国Ⅵ标准 LNG 重型车的整体排放水平.针对混合动力汽车,靖春胜[27]对一辆符合国Ⅴ排放标准的混合动力汽车在 NEDC 和 WLTC 循环工况下的排放特性进行了对比研究.根据该研究结果,我们提取了 0~100km/h 速度范围内的排放因子.

此外,使用 PEMS 对一辆符合国Ⅵ排放标准的混合动力汽车(比亚迪汉)进行了实际道路测试,以获取 0~100km/h 速度范围内的排放因子.PEMS 平台的具体描述见图 2,更多详情可参考本团队以往研究[28].实际道路排放测试在西安的真实道路上完成,测试路线包含城市路段(速度低于 60km/h,平均速度 15~40km/h)、郊区路段(速度 60~90km/h)以及高速公路路段(速度 90~130km/h,其中 100km/h 以上持续至少 5min).

鉴于国Ⅲ标准的 LNG 重型车和混合动力汽车已接近淘汰,本研究在计算中将其忽略.对于国Ⅳ标准车辆,由于保有量较低且相关研究有限,本研究采用综合速度下的排放因子代表其整体排放水平.强

明明[29]对一辆符合国Ⅳ排放标准的混合动力轿车(比亚迪秦)进行了道路排放试验.根据其研究结果,本研究选取了 65~70km/h 速度范围内 4 种道路工况中排放因子最高的值.吴岳[30]对符合国Ⅳ排放标准的 LNG 公交车进行了实际道路排放测试.本研究采用其结果中车辆特定功率(VSP)编号为 3 的天然气公交车的排放因子,代表国Ⅳ标准 LNG 重型车的整体排放水平.

关于 LNG 重型车和混动车的 PM 排放,根据 Quiros 等[31]的研究,压缩天然气(CNG)车辆 PM 质量排放约为柴油车平均值的 50%.通过比较 Li 等[32]和 McCaffery 等[33]在相同测试路线上混合动力车和汽油车的 PM 排放,本研究发现汽油车的 PM 排放是混合动力车辆的 2.5 倍.结合上述研究结果,本研究根据天然气车辆和混合动力车相较于传统车辆的 PM 排放特性,分别采用 0.5 和 0.4 的折减率,并以 PIARC 2019 提供的基础排放数据为参考,估算了 LNG 重型车和混动车的 PM 排放.基于上述文献调研和本研究实际道路测试数据,汇总的排放因子结果见表 1.

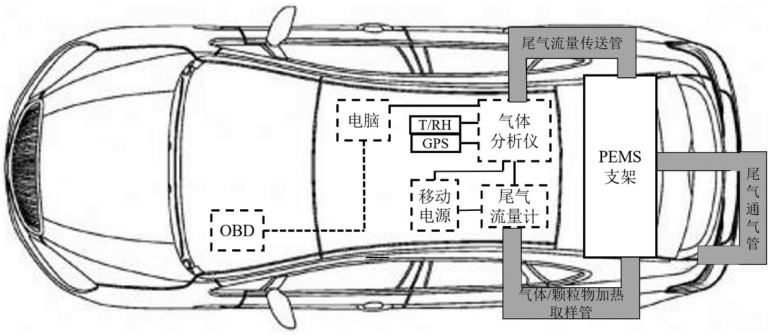


图 2 PEMS 平台整体结构

Fig.2 PEMS platform structure

表 1 新能源汽车排放因子汇总(g/km)

Table 1 Summary of emission factors for new energy vehicles (g/km)

车辆类型	排放标准	污染物	速度(km/h)									
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
LNG 重型车	国Ⅳ	CO	7.8									
		NO_x	4.2									
	国Ⅴ	CO	7.20	1.50	1.00	0.68	0.61	0.6	0.69	0.69	0.56	0.43
		NO_x	13.20	12.21	9.30	5.42	5.81	4.93	8.29	7.11	4.54	1.99
	国Ⅵ	CO	2.59	1.26	0.83	0.62	0.49	0.41	0.35	0.30	0.27	0.24
		NO_x	0.34	0.25	0.21	0.19	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13
轻型混合动力车	国Ⅳ	CO	0.78									
		NO_x	0.05									
	国Ⅴ	CO	0.07	0.08	0.11	0.15	0.18	0.19	0.20	0.20	0.22	0.28
		NO_x	0.008	0.009	0.011	0.012	0.014	0.015	0.013	0.008	0.006	0.007
	国Ⅵ	CO	0.13	0.23	0.24	0.35	0.014	0.011	0.014	0.007	0.01	0.015
		NO_x	0.04	0.029	0.038	0.038	0.034	0.041	0.039	0.046	0.047	0.043

2.2 新能源汽车坡度系数

在坡度修正系数方面,基于 Rosero 等[34]研究中坡度对欧 VI CNG 公交车排放的影响,及排放量与坡度的关系,本研究提取了坡度修正系数.鉴于 CNG 和 LNG 车辆在燃烧原理上的相似性——两者均以气体状态与空气形成均匀混合气体,并通过内燃机气缸点火实现高效燃烧,假设该坡度修正系数同样适用于 LNG 重型车.He 等[35]使用 PEMS 对 6 辆符合国Ⅵ标准的全混合动力 LDPV(轻型乘用车)进行了道路测量,并提供了坡度与 CO、NO_x 排放量之间的拟合函数.基于该拟合函数,本研究确定了混合动力车的坡度修正系数.基于以上研究,本研究汇总了相

关坡度修正系数,详见表 2.

表 2　新能源汽车坡度系数汇总

Table 2　Summary of slope correction factors for new energy vehicles

车辆类型	污染物	坡度(%)								
		−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4
LNG 重型车	CO	0.22	0.61	0.79	0.78	1	1.25	1.55	1.73	1.60
	NO_x	0.74	1.05	1.17	0.96	1	0.87	1.04	0.81	0.42
轻型混合动力车	CO	0.61	0.69	0.78	0.88	1	1.13	1.29	1.46	1.65
	NO_x	0.58	0.66	0.76	0.87	1	1.15	1.31	1.50	1.72

2.3　我国车队分布比例

基于 PIARC 2019 的排放库,旨在对其进行更新和本地化,以更贴合我国的车辆构成及排放特性.因此需要将国内车辆类型匹配为 PIARC 2019 中的 3 种车辆类型[23].其中,PC(Passenger Cars)为乘用车;LCV(Light Commercial Vehicles)通常指最大总质量不超过 3.5t 的轻型货车或厢式车.HGV(Heavy Goods Vehicles)为重型货车,包括单一货车、卡车-挂车组合、半挂车,以及大巴和长途客车等,总质量通常超过 3.5t.根据《中国移动源环境管理年报(2023 年)》[36]中对各车型重量的定义,中型货车的质量为 4.5~12t,因此将其匹配为 HGV.中型客车为 10~19 座,根据《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》[37],其属于 M2 类,重量在 5t 以下,因此将其匹配为 LCV.具体车型的匹配规则如表 3 所示.

表 3　车辆类型匹配规则

Table 3　Vehicle type mapping method

PC(乘用车)	LCV(轻型货车)	HGV(重型货车)
微型客车、小型客车、出租车	中型客车、微型货车、轻型货车	大型客车、中型货车、重型货车、公交车

表 4　2020 年各排放标准下汽车车型组成比例(%)

Table 4　Composition ratio of vehicle types under different emission standards, 2020 (%)

类型	国Ⅰ	国Ⅱ	国Ⅲ	国Ⅳ	国Ⅴ	国Ⅵ
PC 汽油	0.42	3.66	5.25	35.84	39.47	15.02
PC 柴油	0.01	1.06	18.90	56.23	20.92	2.88
PC 混动	0.01	0.00	0.00	4.53	51.91	43.55
LCV 汽油	0.02	0.56	6.50	44.91	31.61	16.39
LCV 柴油	0.01	0.10	24.52	27.85	44.06	3.47
HGV 柴油	0.04	1.17	14.24	18.94	61.73	3.86
HGV 天然气	0.00	0.00	6.10	23.34	45.66	24.90

机动车保有量数据由当地交通管理部门提供.结合表 3 的匹配规则,得到我国(以西安为代表)的车型组成比例(见表 4).

2.4　基准排放因子计算

基准排放率表示特定基准年份中道路上的“平均”车辆,因此需考虑该年份车队的分布比例,其具体计算如式(5)所示.

$$g_{\mathrm{cat}}(v,i)=\sum_{j=1}^{N}\left(g_{\mathrm{cat},j}(v,i)\cdot p_{\mathrm{cat},j}\right) \tag{5}$$

$g_{\mathrm{cat}}(v,i)$为某种车辆类别在速度 v 和坡度 i 下特定污染物(CO、NO_2、颗粒物)的基本排放率,单位为 g/(h·辆); $p_{\mathrm{cat},j}$ 表示符合国标 j 的某类型车辆在该类型车辆中所占的比例.

3　案例应用及对比分析

3.1　通风计算方法对比

以重庆市华岩隧道为案例进行需风量计算与分析[38].该隧道长 4974 米,设计行车速度为 60km/h,平均海拔高度为 310 米,且行车方向纵坡为 2.00%.隧道设计年份为 2030 年,交通量见表 5.根据预测,2030 年西安电动车的普及率约为 33%[39].在本案例中,2030 年电动车渗透率设置为 30%,纯电动车与混动车的比例约为 2:8[36].参考以往研究[14],假设 LNG 重型车在重型车中的渗透率为 40%.

表 5　隧道特征年高峰小时交通量及车辆类型比例

Table 5　Peak hourly traffic volume and vehicle type ratio in tunnels

设计年度	小型客车	大型客车	小型货车	中型货车	大型货车	拖挂、集装箱	混合车辆合计
2020	1629.5	396	664.5	227.5	88.5	43.5	3049.5
2030	3493.5	848.5	1424.5	487.5	190	93.5	6537.5

分别基于 2019PIARC、精细化方法和 2014《细则》计算需风量.由表 6 可见,精细化方法因考虑 LNG 重型车的排放,导致 NO_2 需风量显著升高,相较 2019PIARC 提高了 305.5%.但在 PIARC 2019 方法中,2030 年柴油车的 NO_2 时间因子为 0.22,而 VI 的时间因子为 0.91,这表明其对 VI 的时间衰减考虑小于 NO_2 的衰减.因此,PIARC 2019 方法仍将 VI 视为未来需风量控制的主要因素.这一结论与现有研究的普遍共识不符,即未来 NO_2 可能成为控制需风量的主要因

素[20-21,40].此外,精细化方法因充分考虑了新能源汽车的排放特性,与 PIARC 2019 方法相比,其稀释 CO 和 VI 的需风量分别降低了 10%和 6.5%.与 2014《细则》相比,这一降低幅度更为显著,分别达到了 70.1%和 97.3%.总体来看,2019PIARC 方法虽已关注 NO_2 污染物,但未充分适配国内实际车队结构和排放特性;传统规范则对 NO_2 缺乏关注,且整体需风量显著偏高,存在明显的设计冗余,增加了经济成本.本研究提出的精细化计算方法,更准确地预测了未来随着新能源汽车(特别是 LNG 重型车)渗透率的提升,NO_2 将逐渐取代 CO 和 VI,成为我国公路隧道通风设计中需要优先考虑和控制的主要污染物.

表 6 算例隧道需风量计算结果对比(m^3/s)

Table 6 Comparison of calculated airflow demand in tunnel case studies (m^3/s)

方法	污染物		
	VI	CO	NO
2019PIARC	287.3	27.1	148.1
精细化方法	268.7	24.4	600.6
2014《细则》	899.7	910.9	

为进一步对比精细化方法与 PIARC 2019 方法在不同年份和速度条件下的差异,选取案例中 2020 年与 2030 年的隧道需风量进行计算.假定 2020 年 LNG 重型车的渗透率为 20%,电动汽车的渗透率为 15%.计算结果见图 3.2 种方法计算的稀释 3 种污染物的需风量随着速度变化的趋势较为一致.在 2 个年份中,精细化方法因充分考虑新能源汽车的影响,其计算的稀释 CO 和 VI 的需风量均略低于 PIARC 2019 方法.然而,对于 NO_2,精细化方法计算的稀释 NO_2 需风量始终高于 2019PIARC 方法,尤其在低速段;且随着年度推移(2020 年对比 2030 年),两种方法计算的需风量差异逐渐扩大.此外,从图 3(d)中可以看出,2020 年的设计需风量由稀释 NO_2 的需风量决定.然而,设计年份为 2030 年时,PIARC 2019 方法的设计需风量主要由 VI 控制,而精细化方法则仍由 NO_2 控制.这一差异体现了两种方法在污染物优先控制上的显著不同,进一步验证了本研究提出的精细化计算模型在预测未来主要控制污染物方面的优势,以及 LNG 重型车对隧道需风量的重要影响.

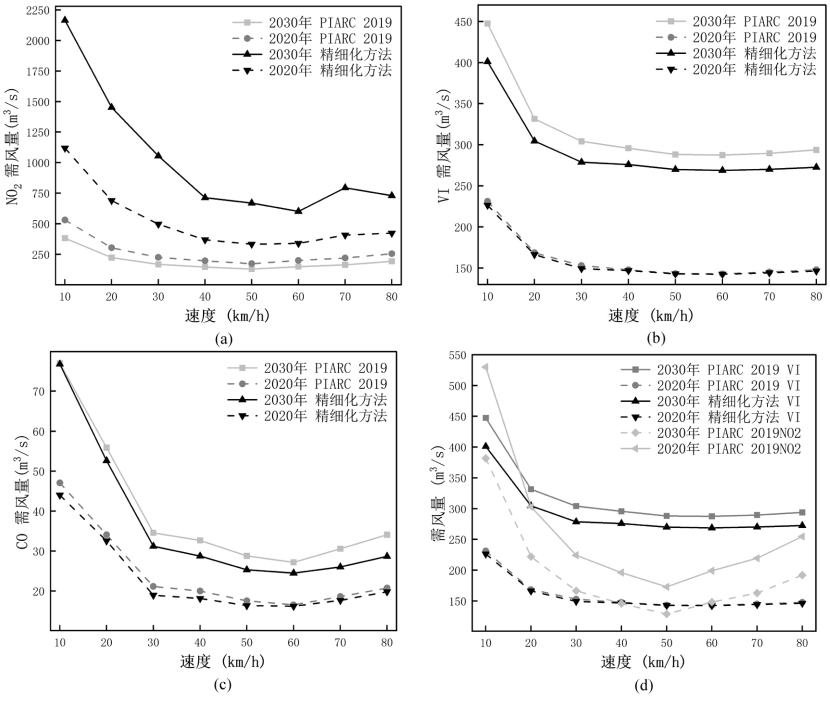


图 3 精细化方法与 2019PIARC 稀释污染物的近远期所需风量

Fig.3 Near- and long-term airflow demand for pollutant dilution: refined vs. PIARC 2019 methods

3.2 新能源汽车渗透率增加的影响

图 4 显示随着 LNG 重型车渗透率的增加,NO_2 需风量显著增长.当 LNG 重型车的渗透率低于 10%时,控制污染物的需风量主要由 VI 决定;但随着渗透率的增加,稀释 NO_2 的需风量呈线性增长,逐步成为主导因素.由于需风量与污染物总排放率成正比,

LNG 重型车的 NO_x 排放量较大,当其他车型比例固定时,LNG 重型车对总 NO_2 排放量的贡献随其渗透率线性增加,导致稀释 NO_2 的需风量线性增长.此外,LNG 重型车渗透率每增加 10%,稀释 NO_2 的需风量增加 103m^3/s,增幅约为 55%;而稀释 CO 和 VI 的需风量减幅较低,分别约为 3.5%和 1.6%.这表明,LNG 重型车渗透率的增加将显著提升隧道的通风需风量,应作为设计通风系统时需要优先考虑的关键控制因素.

相比之下,混合动力汽车和纯电动车渗透率的增加对隧道需风量的影响较小,整体变化幅度不显著.当混合动力汽车渗透率从 0 增加至 50%时,稀释 NO_2 的需风量仅降低 0.15%,稀释 VI 的需风量仅降低 0.47%;只有稀释 CO 的需风量降幅较为明显,为 5.4%.纯电动车渗透率每增加 10%,稀释 CO 和 VI 的需风量降幅与 LNG 重型车相似,均小于 4%;而稀释 NO_2 的需风量变化幅度与混合动力车类似,几乎不变.本研究的结果与以往研究一致,许鹏等[6]基于 Euro 6 基准排放量及 PIARC 方法,计算电动汽车占比为 30%、50%、70%情景下的隧道需风量,所得结果与相同条件下小型汽车的计算结果相差不大.

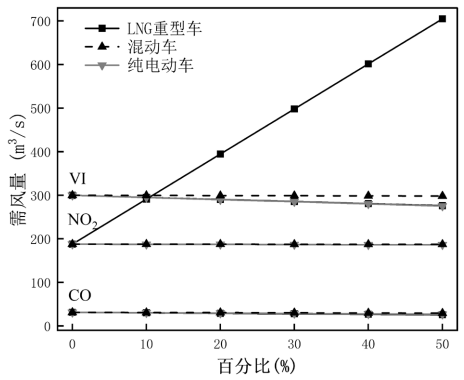


图 4　不同车型渗透率对需风量的影响

Fig.4　The impact of penetration rate of different vehicle models on airflow demand

4　结论

4.1　提出了一种基于特定地区车队分布的新能源汽车基准排放因子库构建方法.以西安车队分布为例,建立了包含 LNG 重型车和混合动力车的基准排放因子库,并对 PIARC 2019 基准排放因子库进行了本地化调整.在此基础上,提出了隧道精细化通风计算方法,以更精确地反映我国车队结构的特点.

4.2　混合动力车和纯电动车对隧道通风的影响较小,而 LNG 重型车的渗透率则对通风设计具有显著影响.随着 LNG 重型车渗透率增加,稀释 NO_2 的需风量呈快速线性增长,将成为未来隧道通风设计的主要控制因素.在本研究的华岩隧道案例中,LNG 重型车渗透率每增加 10%,需风量增加约 103m^3/s.

4.3　相较于 PIARC 2019 方法和我国现行的 2014《细则》,本文提出的精细化隧道通风计算方法能够更准确地反映我国车队结构及新能源汽车发展带来的影响,显著提高了稀释污染物需风量的计算精度,尤其在 NO_2 排放控制方面展现出更高的适用性和准确性.

参考文献：

[1] 魏文迪,王　婷,常俊雨,等.基于隧道实验的机动车源苯并噻唑及其衍生物的排放特征研究 [J/OL]. 中国环境科学, 1-14 [2025-04-09].https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250113.005.
Wei W D, Wang T, Chang J Y, et al. Study on the emission characteristics of benzothiazole and its derivatives from motor vehicles based on tunnel experiments [J/OL]. China Environmental Science,1-14[2025-04-09].https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250113.005.

[2] 黄　青,宋　韬,王伯光,等.城市隧道源排放清单建立方法 [J]. 中国环境科学, 2018,38(8):2898-2902.
Huang Q, Song T, Wang B G, et al. Method for establishing emission inventory of urban tunnel Sources [J]. China Environmental Science, 2018,38(8):2898-2902.

[3] 中华人民共和国交通运输部.2023 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. 2024-06-18[2024-11-03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_24142419.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2023Statistical Bulletin on the Development of the Transportation Industry [EB/OL]. 2024-06-18[2024-11-03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_24142419.html.

[4] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.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.
China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd. Guidelines for design of highway tunnel ventilation: JTG/T D70/2-02—2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.

[5] 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(5):1719-1729.
Tang X, Lin G J, He J, et al. Discussion on the benchmark emission values of vehicle pollutants in highway tunnel ventilation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023,19(5):1719-1729.

[6] 许　鹏,马振硕,伍毅敏,等.渤海海峡超长海底隧道运营通风设计讨论 [J]. 现代隧道技术, 2024,61(3):45-52.

Xu P, Ma Z S, Wu Y M, et al. Discussion on operation ventilation design of Bohai Strait ultra-long undersea tunnel [J]. Modern Tunneling Technology, 2024,61(3):45-52.

[7] 王 旭,王明年,严 涛,等.基准排放因子更新对隧道需风量的影响研究 [J]. 西南交通大学学报, 2024,59(1):113-120.
Wang X, Wang M N, Yan T, et al. Study on the impact of updating benchmark emission factors on tunnel air demand [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024,59(1):113-120.

[8] 郭志杰,孙 涛,张灿程,等.高海拔超长隧道通风烟雾、CO 基准排放量折减率取值建议 [J]. 地下空间与工程学报, 2020,16(S1):341-345.
Guo Z J, Sun T, Zhang C C, et al. Recommendations for the reduction rate of smoke and CO benchmark emissions in high-altitude ultra-long tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020,16(S1):341-345.

[9] 王毅宁,谢静超,薛 鹏,等.公路隧道需风量计算对比分析——基于我国《公路隧道通风设计细则》2014 与国外 PIARC 2019 标准 [J]. 隧道建设(中英文), 2022,42(S1):396-403.
Wang Y N, Xie J C, Xue P, et al. Comparative analysis of highway tunnel ventilation demand calculation——Based on China's 《Guidelines for Design of Highway Tunnel Ventilation》2014 and foreign PIARC 2019 standard [J]. Tunnel Construction, 2022,42(S1): 396-403.

[10] Liu W, Chen J, Luo Y, 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, 2020,2020(1):1686753.

[11] 许昱旻,郭 春.基于移动平均和神经网络的公路隧道运营通风折减率修正研究 [J]. 现代隧道技术, 2022,59(S1):121-127.
Xu Y M, Guo C. Correction research on ventilation reduction rate of highway tunnel operation based on moving average and neural network [J]. Modern Tunneling Technology, 2022,59(S1):121-127.

[12] 车轮飞.公路隧道通风系统设计工程实录 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014:93-123.
Che L F. Design engineering record of highway tunnel ventilation system [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014:93-123.

[13] 立鼎产业研究网.2014~2024 年 H1 我国天然气重卡(LNG 重卡)销量、渗透率增长及市场趋势分析 [EB/OL]. 2024-11-16[2024-10-30].https://www.leadingir.com/trend/view/9521.html.
Leading Industry Research Network. 2014-2024 H1sales volume, penetration rate growth and market trend analysis of natural gas heavy trucks (LNG heavy trucks) in China [EB/OL]. 2024-11-16[2024-10-30].https://www.leadingir.com/trend/view/9521.html.

[14] 郭志杰,张灿程,李志鹏,等.基于清洁能源车辆调查的太岳山隧道通风方案优化 [J]. 现代隧道技术, 2022,59(S1):818-824.
Guo Z J, Zhang C C, Li Z P, et al. Optimization of Taiyue Mountain tunnel ventilation scheme based on investigation of clean energy vehicles [J]. Modern Tunneling Technology, 2022,59(S1):818-824.

[15] 何应道,徐志胜,薛光桥.通行新能源机动车隧道中特征污染物的数值模拟 [J]. 安全与环境学报, 2021,21(3):1310-1315.
He Y D, Xu Z S, Xue G Q. Numerical simulation of characteristic pollutants in tunnels with new energy vehicles [J]. Journal of Safety and Environment, 2021,21(3):1310-1315.

[16] 曾弘锐,苏开春,冷希乔,等.新能源车混入影响下的公路隧道运营通风设计折减系数研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2024,44:1385-1396.
Zeng H R, Su K C, Leng X Q, et al. Study on reduction coefficient of highway tunnel operation ventilation design under the influence of mixed new energy vehicles [J]. Tunnel Construction, 2024,44:1385-1396.

[17] 王 亮,张 浩.基于新能源车组成的特长水下公路隧道运营通风方案研究 [J]. 现代隧道技术, 2024,61(1):67-74.
Wang L, Zhang H. Study on operation ventilation scheme of extra-long subsea highway tunnel based on the composition of new energy vehicles [J]. Modern Tunneling Technology, 2024,61(1):67-74.

[18] 万建国,彭劲松.公路隧道营运通风节能优化设计探讨 [J]. 现代隧道技术, 2019,56(S2):471-477.
Wan J G, Peng J S.Discussion on energy-saving optimization design of highway tunnel operation ventilation [J]. Modern Tunneling Technology, 2019,56(S2):471-477.

[19] Li Q, Chen C, Deng Y, et al. Influence of traffic force on pollutant dispersion of CO, NO and particle matter ($PM_{2.5}$) measured in an urban tunnel in Changsha, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015,49:400-407.

[20] Wang M, Wang X, Yu L, et al. Field measurements of the environmental parameter and pollutant dispersion in urban undersea road tunnel [J]. Building and Environment, 2019,149:100-108.

[21] Qian C, Chen J, Luo Y, et al. Monitoring and analysis of the operational environment in an extra-long highway tunnel with longitudinal ventilation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,83:475-484.

[22] 潘 华,陈雪松,王 莉,等.TiO_2 光催化净化城市隧道中 NO_x 的行为及经济性 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):118-125.
Pan H, Chen X S, Wang L, et al. Behavior and economy of NO_x purification in urban traffic tunnel by TiO_2 photocatalysis [J]. China Environmental Science, 2019,39(1):118-125.

[23] PIARC-World Road Association, PIARC technical committee on road tunnels operation (C5). Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation [R]. France: World Road Association, 2019.

[24] Zheng F, Zhang H, Yin H, et al. Evaluation of real-world emissions of China V heavy-duty vehicles fueled by diesel, CNG and LNG on various road types [J]. Chemosphere, 2022,303:135137.

[25] Wang J, Gui H, Yang Z, et al. Real-world gaseous emission characteristics of natural gas heavy-duty sanitation trucks [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022,115:319-329.

[26] 王志红,黄钰焜,张远军,等.基于动力学参数的国Ⅵ重型天然气车实际道路排放特性研究 [J]. 华东交通大学学报, 2022,39(4):32-40.
Wang Z H, Huang Y K, Zhang Y J, et al. Study on the actual road emission characteristics of China VI heavy natural gas vehicles based on kinetic parameters [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022,39(4):32-40.

[27] 靖春胜.典型混合动力汽车排放及油耗特性的研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2020.
Jing C S. Research on emission and fuel consumption characteristics of typical hybrid electric vehicles [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.

[28] Wang X, Qiu Z, Liu Z, et al. Real-world black carbon emissions of gasoline vehicles at urban intersections [J]. Urban Climate, 2024,55: 101968.

[29] 强明明.混合动力轿车行驶特征与污染物排放特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
Qiang M M. Research on driving characteristics and pollutant emission characteristics of hybrid electric vehicles [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

[30] 吴　岳.清洁能源公交车实际道路排放特性研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2016.
Wu Y. Research on real-world emission characteristics of clean energy buses [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[31] Quiros D C, Thiruvengadam A, Pradhan S, et al. Real-world emissions from modern heavy-duty diesel, natural gas, and hybrid diesel trucks operating along major California freight corridors [J]. Emission Control Science and Technology, 2016,2(3):156-172.

[32] Li C, Sato S, Ma T, et al. Real-world evaluation of pollutant emissions from a light-duty DI-gasoline hybrid electric vehicles (HEV) using PEMS [J]. Emission Control Science and Technology, 2023,9(1):1-11.

[33] McCaffery C, Zhu H, Li C, et al. On-road gaseous and particulate emissions from GDI vehicles with and without gasoline particulate filters (GPFs) using portable emissions measurement systems (PEMS) [J]. Science of The Total Environment, 2020,710:136366.

[34] Rosero F, Fonseca N, López J-M, et al. Effects of passenger load, road grade, and congestion level on real-world fuel consumption and emissions from compressed natural gas and diesel urban buses [J]. Applied Energy, 2021,282:116195.

[35] He L, You Y, Zheng X, et al. The impacts from cold start and road grade on real-world emissions and fuel consumption of gasoline, diesel and hybrid-electric light-duty passenger vehicles [J]. Science of The Total Environment, 2022,851:158045.

[36] 中国移动源环境管理年报 [R]. 北京:生态环境部, 2023.
Annual report on mobile source environmental management in China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2023.

[37] GB17691—2018　重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S].
GB17691—2018　Limits and measurement methods for emissions from heavy-duty diesel vehicles (China VI) [S].

[38] 张梦琪.基于有效控制污染物浓度的公路隧道设计需风量研究 [D]. 成都:西华大学, 2018.
Zhang M Q. Study on the required air volume for highway tunnel design based on effective control of pollutant concentration [D]. Chengdu: Xihua University, 2018.

[39] Duan S, Qiu Z, Liu Z, et al. Impact assessment of vehicle electrification pathways on emissions of CO_2 and air pollution in Xi'an, China [J]. Science of The Total Environment, 2023,893:164856.

[40] Li Q. Chen C Survey and measurement of the vehicle pollutant emission in urban underground bifurcate tunnel, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,48:101519.

作者简介：王　鑫(1994-),男,陕西神木人,长安大学博士研究生,研究方向为交通环境污染.发表论文 3 篇.wxin@chd.edu.cn.