

基于交通仿真的高速公路交通事故拥堵排放特性

武青青,余雪,高超,齐蕊,刘华龙,王健

山东交通学院交通与物流工程学院,山东 济南 250357

摘要:为分析高速公路上由交通事故造成的交通流拥堵状态的车辆尾气污染物排放特性,采用微观仿真软件 VISSIM 仿真高速公路交通流拥堵状态和流畅状态的车辆运行数据,基于比功率(vehicle specific power, VSP)的车辆尾气污染物排放测算模型计算 2 种状态下不同车型的尾气污染物排放量,并进行对比分析,通过综合移动源排放模型(motor vehicle emission simulator, MOVES)验证基于 VSP 排放测算结果的准确性。结果表明:拥堵状态下不同车型车辆加速工况的尾气污染物排放量大于减速与怠速工况;交通流拥堵状态下车辆 CO、NO_x、HC 与 CO₂ 的排放量约为流畅状态下的 1.86、1.86、2.15、2.01 倍,高速公路交通事故拥堵状态下的尾气污染物排放量远高于流畅状态;2 种模型对 4 类尾气污染物排放测算结果较接近,相对平均偏差较小。

关键词:高速公路;交通事故;拥堵;尾气排放;微观仿真;VSP

中图分类号:U491.9

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0026-05

引用格式:武青青,余雪,高超,等.基于交通仿真的高速公路交通事故拥堵排放特性[J].山东交通学院学报,2024,32(3):26-30.

WU Qingqing, YU Xue, GAO Chao, et al. Emission characteristics of highway traffic accident congestion based on traffic simulation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 26-30.

0 引言

随着经济的发展,高速公路车流量持续上升,交通事故发生率随之增大,交通事故造成的交通流拥堵会增大车辆燃油消耗及尾气污染物排放,影响高速公路行车环境。研究交通事故拥堵时车辆的尾气污染排放具有重要的现实意义。

国内外学者对车辆尾气污染物排放开展广泛研究。城市道路方面,吴孟庭等^[1]采用微观仿真软件 VISSIM 分析设置公交专用道前、后路段的交通流变化及污染物排放因子变化;李嘉智^[2]将微观仿真软件 VISSIM 与综合移动源排放模型(motor vehicle emission simulator, MOVES)结合,基于比功率(vehicle specific power, VSP)排放测算模型计算城市道路信号交叉口的车辆尾气排放;Lü 等^[3]分析城市相邻交叉口的协调控制对城市道路车辆尾气排放的影响;Abdull 等^[4]基于车辆排放模型预测日本京都市国道上轿车和卡车的交通特征和尾气污染物排放。高速公路是连接城市的重要纽带,承担大量客、货车运输活动,对高速公路排放污染研究主要集中在高速公路污染物排放时空分布特征,程大千等^[5]基于道路车辆大气污染物排放清单和 CALINE-4 扩散模式,分析江苏省高速公路网车辆污染物排放及扩散的时空分布特征;高丹丹等^[6]采用排放因子法,建立河南省 2016 年高速公路车辆高分辨率大气污染物排放清单;邹泽耀等^[7]基于福建省高速公路交通流量数据,建立福建省 2020 年部分月份的高速公路车辆高分辨率污染物排放清单;李宾等^[8]以湘潭市大桥饭店路口为例,根据现场调研数据计算车辆怠速与慢速 2 种情形的拥堵碳排放,认为湘潭市交通拥堵导致的能耗和碳排放的增加幅度不小于 30%;王景荣等^[9]建立交通拥

收稿日期:2024-01-25

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022MG077)

第一作者简介:武青青(2000—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为交通运输,E-mail:wqq2263528712@163.com。

堵碳排放计算模型,为计算高速公路拥堵时的碳排放提供理论依据。随机机动车保有量的增大,高速公路交通事故拥堵和空气污染问题日益严重,从微观层面对高速公路交通事故造成交通拥堵时车辆尾气污染物排放特性的研究较少。

本文基于济南市高速公路车流调查数据,采用微观仿真软件 VISSIM 模拟高速公路交通流拥堵状态和流畅状态下车辆运行数据,通过基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型计算并对比 2 种交通流状态下车辆尾气污染物排放量,为交通管理部门降低车辆尾气污染、改善高速公路的行车环境提供数据支持。

1 排放测算模型与仿真方法

1.1 排放测算模型

车辆在行驶过程中的污染物排放与能源消耗、功率输出密切相关。VSP 是车辆发动机瞬时输出功率与车辆质量之比,与车辆瞬时速度、瞬时加速度等有关^[10],基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型可计算不同车辆类型、不同运行状态的车辆尾气排放量。

比功率的计算式^[11]为:

$\{P_{VSP}\} = \{v\} [\{a\} (1 + \varepsilon_i) + \{g\} \sin \{\theta\}] + C_R \{g\} \{v\} + 0.5 \{\rho_a\} C_D \{A\} (\{v\} + \{v_{wind}\})^2 \{v\} / \{m\}$,
式中: $\{P_{VSP}\}$ 为以 kW/t 为单位的车辆比功率 P_{VSP} 的数值; $\{v\}$ 为以 m/s 为单位的车速 v 的数值; $\{a\}$ 为以 m/s^2 为单位的加速度 a 的数值; ε_i 为滚动质量系数,一般 $\varepsilon_i=0.1$; $\{g\}$ 为以 m/s^2 为单位的重力加速度 g 的数值; $\{\theta\}$ 为以($^\circ$)为单位的道路坡度 θ 的数值,此处 $\{\theta\}=0$; C_R 为滚动阻力系数,此处 $C_R=0.0135$; $\{A\}$ 为以 m^2 为单位的车头横截面积(竖面) A 的数值; $\{\rho_a\}$ 为以 kg/m^3 为单位的空气密度 ρ_a 的数值; C_D 为风阻系数; $\{v_{wind}\}$ 为以 m/s 为单位的车辆迎面风速 v_{wind} 的数值; $\{m\}$ 为以 t 为单位的车辆质量 m 的数值。

简化后,轻型车比功率的计算式^[12]为:

$$\{P_{VSPL}\} = \{v\} (1.1 \{a\} + 0.132) + 0.000302 \{v\}^3, \quad (1)$$

式中 $\{P_{VSPL}\}$ 为以 kW/t 为单位的轻型车比功率 P_{VSPL} 的数值。

重型车的结构和质量与轻型车差异较大,重型车比功率的计算式^[13]为:

$$\{P_{VSPH}\} = \{v\} (\{a\} + 0.09199) + 0.000169 \{v\}^3, \quad (2)$$

式中 $\{P_{VSPH}\}$ 为以 kW/t 为单位的重型车比功率 P_{VSPH} 的数值。

将车辆 VSP 按一定的间隔划分为不同的区间,车辆在不同 VSP 区间的污染物排放率(区间平均瞬时排放率)不同。不同车辆 VSP 区间的污染物排放率如表 1 所示^[10]。

表 1 不同车辆 VSP 区间的污染物排放率

比功率/ (kW·t ⁻¹)	污染物排放率/(g·s ⁻¹)				比功率/ (kW·t ⁻¹)	污染物排放率/(g·s ⁻¹)			
	CO	CO ₂	NO _x	HC		CO	CO ₂	NO _x	HC
<-2	0.011 03	1.543 69	0.001 01	0.000 90	[13,16)	0.036 94	5.374 22	0.006 37	0.002 33
[-2,0)	0.008 72	1.604 41	0.001 04	0.000 90	[16,19)	0.049 51	5.940 05	0.007 66	0.002 82
[0,1)	0.004 68	1.130 83	0.000 42	0.000 84	[19,23)	0.063 76	6.427 51	0.009 91	0.002 99
[1,4)	0.012 15	2.386 26	0.001 61	0.001 03	[23,28)	0.105 38	7.065 99	0.012 69	0.003 79
[4,7)	0.016 73	3.210 25	0.002 64	0.001 25	[28,33)	0.247 81	7.617 70	0.014 38	0.004 57
[7,10)	0.023 27	3.957 73	0.003 79	0.001 66	[33,39)	0.413 07	8.322 44	0.015 97	0.005 70
[10,13)	0.029 32	4.752 01	0.005 10	0.002 09	≥39	0.624 66	8.475 03	0.016 72	0.007 16

采用基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型计算尾气污染物排放量时,将车辆在各 VSP 区间的行驶时间与该区间对应的污染物排放率之积累加后得总排放量^[2]

$$E = \sum_{i=1}^n t_i R_i, \quad (3)$$

式中: n 为 VSP 区间数, t_i 为车辆在第 i 个 VSP 区间的行驶时间, R_i 为第 i 个 VSP 区间污染物的排放率。

1.2 仿真方法

微观仿真软件 VISSIM 能模拟微观道路交通状况,通过设置不同参数可输出不同的车辆运行数据。在软件 VISSIM 中构建长 10 km 的双向四车道高速公路,车流量为 3 000 辆/h,限速 100 km/h,车辆类型包括客一(荷载 7 座及 7 座以下的载客汽车)、货一(车长不大于 3.5 m 且总质量不大于 1 800 kg 的载货汽车,但不包括三轮汽车和低速货车)、货三(总质量不小于 12 000 kg 的载货汽车),为实测高速公路占比较高的 3 种车型,按 0.85 : 0.09 : 0.06 设置 3 种车型的辆数,分别模拟高速公路交通流流畅状态和拥堵状态下的车辆运行数据。设置路网预热时间为 0~1 000 s,在自西向东外侧车道设置交通事故故障车辆,车辆故障时间(从开始拥堵到交通事故车辆移除)为 1 000~2 800 s,仿真时间为 5 000 s,在事故道路上每隔 100 m 设置排队计数器。通过软件 VISSIM 内部数据采集器采集道路信息、排队车辆数等数据,采用 Vehicle Record 模块输出仿真时间、时刻信息、车辆编号、车辆类型、车辆速度、车辆加速度等数据,根据输出数据计算车辆尾气污染物排放量。

2 仿真计算结果

通过 VISSIM 仿真得出高速公路自西向东单向车道交通流拥堵状态和流畅状态下的不同车型的瞬时速度、瞬时加速度等数据,结合式(1)(2)计算 3 种车型的瞬时 VSP,由表 1 得到污染物排放率,采用式(3)计算高速公路交通流拥堵状态与流畅状态下不同车型的 HC、CO、NO_x、CO₂ 污染物排放量,并与 MOVES 模型的测算结果对比,验证基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型的准确性。

2.1 尾气污染物排放测算

高速公路发生交通事故后,上游车辆到达区与拥堵区交界处形成集结波,清理事故车辆后,拥堵区与恢复区交界处形成消散波^[14],此时,拥堵不会立即消失,消散波与集结波继续向上游移动,持续影响交通流。

高速公路交通流拥堵状态下车辆在仿真时间内的瞬时速度如图 1 所示。由图 1 可知:拥堵状态下车辆可分为 3 种行驶情况,包括未到达拥堵路段时在某种车流密度下正常行驶,拥堵路段频繁怠速、加速、减速行驶,通过拥堵路段逐渐恢复正常行驶。拥堵路段车辆怠速、加速、减速 3 种运行工况时间占比分别为 27.1%、44.7%、28.2%,加、减速工况时间占比达 72.9%,说明拥堵状态下车辆加、减速较频繁。在仿真时间 5 000 s 内,交通流拥堵状态下不同车型车辆在怠速、加速、减速工况下的尾气污染物排放量如表 2 所示。

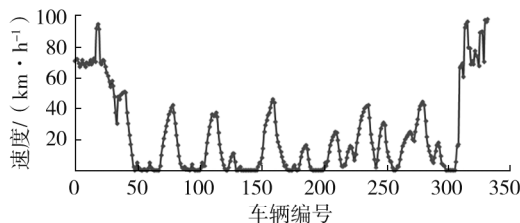


图 1 高速公路交通流拥堵状态下不同车辆在仿真时间内的瞬时速度

表 2 拥堵状态下不同车型车辆怠速、加速、减速工况下的尾气污染物排放量

车型	怠速工况污染物排放量/kg				加速工况污染物排放量/kg				减速工况污染物排放量/kg			
	CO	NO _x	HC	CO ₂	CO	NO _x	HC	CO ₂	CO	NO _x	HC	CO ₂
客一	8.43	0.80	0.43	821.36	14.78	1.39	0.76	1 439.47	9.43	0.89	0.48	918.81
货一	1.48	0.14	0.08	143.74	1.74	0.17	0.09	169.35	0.99	0.09	0.05	96.15
货三	0.63	0.06	0.03	61.60	0.87	0.08	0.04	84.67	0.55	0.05	0.03	53.42

由表 2 可知:不同车型车辆加速工况的尾气污染物排放量大于减速与怠速工况;客一在不同工况下的尾气污染物排放量大于货一与货三,原因是高速公路上客一的车辆数占比大于货一与货三,整体尾气

污染物排放相对较多。

去除故障车辆,在相同路段、相同时间内仿真交通流流畅状态下车辆运行工况,通过基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型计算高速公路流畅状态下不同车型的单车污染物排放量,并与拥堵状态下单车污染物排放量对比,结果如表 3 所示。由表 3 可知:3 种车型在拥堵状态下单车的尾气污染物排放量明显大于流畅状态;拥堵状态下,客一的单车 CO 排放量大于货一和货三,货一和货三的单车 NO_x、HC、CO₂ 排放量大于客一,客一主要以汽油为燃料,汽油燃烧不充分的主要污染物为 CO,货一和货三运行速度小且多以柴油为燃料,主要尾气污染排放物为 NO_x;流畅状态下,货三单车 CO、NO_x、HC、CO₂ 的排放量均大于货一和客一。

表 3 拥堵状态与流畅状态下不同车型的单车尾气污染物排放量对比

车型	拥堵状态污染物排放量/(g·辆 ⁻¹)				流畅状态污染物排放量/(g·辆 ⁻¹)			
	CO	NO _x	HC	CO ₂	CO	NO _x	HC	CO ₂
客一	9.32	0.85	0.45	807.16	4.96	0.45	0.20	407.45
货一	7.35	1.04	0.71	1 293.26	4.69	0.65	0.39	895.46
货三	8.57	1.18	0.78	1 509.36	5.21	0.73	0.43	962.31

拥堵状态与流畅状态车辆尾气污染物排放总量对比如表 4 所示。

由表 4 可知:拥堵状态下,3 种车型的 CO、NO_x、HC、CO₂ 排放总量分别约为流畅状态下的 1.86、1.86、2.15、2.01 倍,高速公路交通事故拥堵状态下的车辆尾气污染物排放量明显大于流畅状态。

表 4 2 种状态下车辆尾气污染物排放总量

状态	车辆尾气污染物排放总量/kg			
	CO	NO _x	HC	CO ₂
拥堵	38.90	3.65	1.98	3 788.57
流畅	20.91	1.96	0.92	1 882.30

2.2 MOVES 模型仿真验证

根据济南市高速公路实际情况修正 MOVES 3.1 模型中的地理信息、气象因素、燃油信息等参数后^[15-18],测算高速公路交通流拥堵与流畅状态的车辆尾气污染物排放量。

计算相对平均偏差,衡量 2 种模型估算的车辆尾气污染物排放量偏离平均排放量的程度,验证基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型的准确性,相对平均偏差

$$R_{MD} = d/\bar{x} \times 100\%,$$

式中: d 为 2 种模型测算的尾气污染物排放量的偏差, $\bar{x}$ 为 2 种模型测算的平均尾气污染物排放量。

在拥堵状态与流畅状态下,2 种模型测算的车辆尾气污染物排放量对比结果如表 5 所示。由表 5 可知:2 种模型对高速公路拥堵与流畅状态下 4 类污染物排放量的测算结果较接近,相对平均偏差为 2.00%~18.00%,表明基于 VSP 的车辆尾气排放测算模型的结果较准确。

表 5 拥堵状态与流畅状态下 2 种模型测算结果对比

模型	拥堵状态车辆尾气污染物排放量/kg				流畅状态车辆尾气污染物排放量/kg			
	CO	NO _x	HC	CO ₂	CO	NO _x	HC	CO ₂
VSP	38.90	3.65	1.98	3 788.57	20.91	1.96	0.92	1 882.30
MOVES	27.41	3.86	1.77	2 894.73	15.22	2.52	0.80	1 713.82
$R_{MD}/\%$	17.33	2.80	5.60	13.37	15.75	12.50	6.98	4.69

3 结论

基于济南市高速公路车流调查数据,采用微观仿真软件 VISSIM 模拟仿真双向 4 车道高速公路由交通事故造成的拥堵状态与无交通事故流畅状态的车辆行驶状态,通过基于比功率的车辆尾气污染物排放测算模型测算客一、货一、货三 3 种主要车型在拥堵状态与流畅状态下的尾气污染物排放量。

1)高速公路上客一车辆数占比大于货一、货三,不同工况下的尾气污染物排放量大于货一、货三,考虑运输费用时,货车司机可能会选择国道、省道行驶,高速公路上重型货车数占比较小,尾气污染物排放较小。

2)高速公路拥堵状态下,不同车型车辆加速工况下污染物排放量大于减速与怠速工况。

3)高速公路拥堵状态下 CO 、 NO_x 、 HC 、 CO_2 排放量约为流畅状态下的 1.86、1.86、2.15、2.01 倍,高速公路交通事故拥堵状态下的车辆尾气污染物排放量明显大于流畅状态,应尽可能缩短高速公路交通事故处理时间,减少高速公路整体尾气污染物排放。

参考文献:

- [1] 吴孟庭,李铁柱.路段公交专用道对车辆燃油消耗与污染物排放的影响分析[J].交通运输工程与信息学报,2009,7(3):78-86.
- [2] 李嘉智.面向低污染排放的交通信号控制模型与优化方法研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [3] LÜ J P, ZHANG Y L. Effect of signal coordination on traffic emission[J]. Transportation Research Part D:Transport and Environment,2012,17(2):149-153.
- [4] ABDULL N, YONEDA M, SHIMADA Y. Traffic characteristics and pollutant emission from road transport in urban area[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2020,13:731-738.
- [5] 程大千,邹庆,张魁,等.机动车污染物排放及扩散的时空分布特征研究:以江苏省高速公路网为例[J].公路交通科技,2020,37(11):139-149.
- [6] 高丹丹,尹沙沙,谷幸珂,等.河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征[J].环境科学,2021,42(8):3663-3675.
- [7] 邹泽耀,郑鑫程,徐崇敏,等.疫情背景下的福建省高速公路机动车污染物排放清单[J].环境科学学报,2022,42(5):119-128.
- [8] 李宾,周俊.交通拥堵的碳排放效应:以湘潭市大桥饭店路口为例[J].城市问题,2017(6):46-51.
- [9] 王景荣,肖鹤,解建光.高速公路拥堵碳排放计算模型研究[J].现代交通技术,2015,12(2):81-84.
- [10] 赵玉.考虑低排放的交叉口信号优化方法研究[D].长春:吉林大学,2022.
- [11] SRINIVASAN D, CHOY M C, CHEU R L. Neural networks for real-time traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006,7(3):261-272.
- [12] DAVIS N, LENTS J, OSSES M, et al. Development and application of an international vehicle emissions model[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1939(1):155-165.
- [13] ANDREI P. Real world heavy-duty vehicle emissions modeling[D]. Morgantown: West Virginia University,2001.
- [14] 余雪,高超,张冲,等.基于 VISSIM 仿真的高速公路交通事故拥堵扩散与消散预测[J].山东交通学院学报,2023,31(3):47-52.
- [15] 姚胜永,李亚楠,刘佳豪.基于 MOVES 模型的石家庄市机动车排放清单研究[J].交通节能与环保,2019,15(6):4-9.
- [16] 岳园圆,宋国华,黄冠涛,等. MOVES 在微观层次交通排放评价中的应用研究[J].交通信息与安全,2013,31(6):47-53.
- [17] 李嘉智.信号交叉口机动车尾气排放总量估算模型研究[J].公路与汽运,2022(3):37-44.
- [18] 李菊,何超,柏洋洋.基于 MOVES 的高速公路客运交通排放特性研究[J].机电工程技术,2023,52(2):102-105.

Emission characteristics of highway traffic accident congestion based on traffic simulation

WU Qingqing, YU Xue, GAO Chao, QI Rui, LIU Hualong, WANG Jian

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To analyze the emission characteristics of vehicle exhaust pollutants under congested highway traffic

(下转第 68 页)