

唐山市机动车排放清单与减排经济效益研究

王计广^{1,2,3}, 桂华侨^{1,2*}, 陈金潮⁴, 王志伟⁵, 孙世达⁶, 杨志文³, 张潇文³, 毛洪钧⁶ (1.中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2.中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 3.中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300; 4.河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300401; 5.唐山市环境监控中心, 河北 唐山 063015; 6.南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要: 基于唐山市机动车定期环保检测数据获取不同类型车辆的本地年均行驶里程, 建立城区内典型车辆的“里程-注册年”特征曲线. 采用车载排放测试法获取唐山市典型国VI阶段轻型汽车实际道路排放因子. 利用 COPERT 模型进行机动车排放因子本地化修正, 建立涵盖不同排放阶段和燃料动力类型的唐山市机动车排放清单, 结合唐山市路网信息, 建立基于 ArcGIS 的 3km×3km 高时空分辨率网格化排放清单, 并分析了国三及以下中重型柴油车(简称高排放车)不同淘汰与 DPF 排放治理比例情景下机动车减排与投入成本效益. 研究表明, 2020 年机动车 CO, HC, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀ 年排放量分别为 92403.51, 10034.53, 70568.35, 2036.51, 2160.65t, 其中 NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放主要来源于柴油车, 分担率分别为 92%, 89% 和 89%; CO 和 HC 排放主要来自汽油车, 分担率分别为 71% 和 73%. 唐山市实施二环内国IV及以下柴油货车限行区政策后, 二环内 CO 和 HC 年排放量削减率分别为 22.41% 和 21.68%; 而 NO_x, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染物排放强度显著降低, 年排放量削减率分别为 78.60%, 84.85% 和 84.79%. 在高排放车淘汰与治理情景下, 随着高排放车淘汰比例的增长, 投入成本和 NO_x 年均减排量呈线性上升趋势, 且 NO_x 减排效果更加显著, 而 PM 减排辆略呈下降趋势. 高排放车淘汰率每增长 10%, NO_x 年均减排量增加 892.41t, PM 年均减排量减少 7.56t, 年投入成本增加 1.13 亿元.

关键词: 排放清单; 机动车排放; 年均行驶里程; 定期环保检测; DPF 治理; 减排经济效益

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)11-5114-11

Vehicle emission inventory and economic benefits of emission reduction in Tangshan. WANG Ji-guang^{1,2,3}, GUI Hua-qiao^{1,2*}, CHEN Jin-chao⁴, WANG Zhi-wei⁵, SUN Shi-da⁶, YANG Zhi-wen³, ZHANG Xiao-wen³, MAO Hong-jun⁶ (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. China Automotive Technology & Research Center Co. Ltd, Tianjin 300300, China; 4. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 5. Tangshan Environmental Monitoring Center, Tangshan 063015, China; 6. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China). *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5114~5124

Abstract: Based on the vehicle regular environmental inspection test data, the local average mileage of different vehicle types was obtained, and the "mileage-registration year" characteristic curve of typical vehicles in Tangshan was established. The actual road emission factors of typical China VI vehicles was obtained by PEMS. According to localized correction of vehicle emission factors by COPERT, the Tangshan vehicle emission inventory covering different emission stages and fuel power types was developed. Combining with the road network information of Tangshan, 3km×3km high spatial and temporal resolution grid vehicle emission inventory based on ArcGIS was developed. On this basis, emission reduction and input cost-effectiveness under different ratios scenarios of China III and below heavy diesel vehicles (referred to as high emission vehicles) elimination and DPF retrofit were analyzed. The results show that the CO, HC, NO_x, PM_{2.5} and PM₁₀ annual emissions in 2020 were 92403.51, 10034.53, 70568.35, 2036.51 and 2160.65 tons respectively, which NO_x, PM_{2.5} and PM₁₀ were mainly from diesel vehicles, accounting for 92%, 89% and 89% respectively; CO and HC emissions were mainly from gasoline vehicles, accounting for 71% and 73% respectively. After the implementation of diesel truck restriction zone policy for China IV and below emission standard in the Second Ring Road, the annual CO and HC emission reduction rates in the Second Ring Road were 22.41% and 21.68%, while the emission intensity of NO_x, PM₁₀ and PM_{2.5} pollutants had been significantly reduced, and the annual emissions reduction rates were 78.60%, 84.85% and 84.79%, respectively. Under the scenario of elimination and treatment of high emission vehicles, with the increase of high emission elimination ratio, the input cost and annual NO_x emission reduction showed a linear upward trend, and the NO_x emission reduction effect was more significant, while the PM emission reduction vehicles showed a slight downward trend. For every 10% increase in

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42005108), 安徽省优秀青年科技基金(1808085J19)

* 责任作者, 研究员, hqgui@aofm.ac.cn

the elimination rate of high emission vehicles, the annual NO_x emission reduction increased by 892.41 tons, the annual PM emission reduction decreases by 7.56 tons, and the annual input cost increased by 113 million RMB.

Key words: emission inventory; vehicle emission; vehicle kilometers travelled; periodic environmental inspections; DPF retrofit; economic benefits of emission reduction

我国城市空气污染已由燃煤型污染转向区域复合型污染,机动车污染已成为我国空气污染的重要来源,是造成雾霾、光化学烟雾的重要原因^[1-3]。因此,控制机动车污染物排放,对改善城市环境空气质量具有重要意义^[4-5]。

排放清单^[6-7]是研究机动车污染物排放特征与政策评估的重要手段,是科学制定机动车污染防治政策的重要依据。孙世达等^[8]、樊守彬等^[9]和金嘉欣等^[10]基于精细化年均行驶里程、车流量等参数开展区域机动车排放清单以及不同管控措施情景分析,Perugu 等^[11]、Pahlvik 等^[12]利用排放模型建立机动车排放清单。但现有研究中排放清单基础数据的获取和使用存在的问题:一是部分研究直接采用生态环境部发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》^[13](简称《指南》)中给出了不同排放阶段、燃油类型和车辆类型的排放因子(g/km)与年均行驶里程(km/a)的推荐值,用于测算区域机动车污染物排放量。但在实际中,排放因子与年均行驶里程受到交通路况、地理环境、经济水平等多种因素的影响,直接采用《指南》推荐值往往难以反映区域的实际污染排放特征^[6,14];二是唐山等部分城市已陆续实施机动车国VI排放标准,但相关文献中尚未有涵盖国VI车型的排放清单报道;三是已有研究主要根据车辆类型(如微型、中型、重型客货车)设定机动车的活动特征^[15](主要指年均行驶里程),缺乏对于城市常用典型车辆类型(如出租车、公交车、环卫车)的里程规律研究,难以准确评估城区内机动车污染物排放。此外,国内外对不同减排情景下污染物减排量等进行了估算,但对减排-经济投入成本效益关系研究较少,难以为减排政策制定提供有力支撑。唐山作为北方沿海传统的资源型重工业城市,是国家重要的能源、原材料基地,其机动车保有量由2000年的44余万辆增长至2020年的217余万辆,年均增长率19.7%,其尾气排放已成为唐山市除工业外第二大污染源^[16],但目前尚无基于实际活动特征的唐山市机动车排放清单研究,难以有效评估唐山市机动车实际排放。

本研究以唐山市机动车为研究对象,通过机动车定期环保检测和保有量数据,研究分析不同车辆类型的实际年均行驶里程活动特征,建立城区内典型车型(如出租车、公交车、环卫车等)“里程-注册年”特征曲线;在《指南》排放因子推荐值的基础上利用 COPERT 模型进行本地化修正,并运用车载排放测试设备(PEMS)对唐山市典型的新增国VI阶段轻型汽车开展实际道路排放测试,构建唐山市机动车排放因子清单,结合交通路网数据建立唐山市高时空分辨率的机动车排放清单,研究国三及以下中重型柴油车淘汰与 DPF 排放治理不同比例情景下机动车减排与投入成本效益,为唐山市机动车排放管控与污染治理决策提供支撑。

1 材料与方法

1.1 机动车排放清单的建立

1.1.1 排放清单计算方法 依据《指南》,机动车污染物排放量主要根据保有量、年均行驶里程和排放因子进行测算。

$$E_{j,k} = \sum_i \sum_h P_{i,h,k} \times \text{VKT}_i \times \text{EF}_{i,j,h,k} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: E 为机动车 CO, HC, NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染物年排放量,t; P 为机动车的保有量,辆; EF 为机动车排放因子, g/km; VKT_i 为 i 类型机动车的年均行驶里程, km/a; i 为车辆类型,本文中主要包括微型客车、小型客车、中型客车、大型客车、微型货车、轻型货车、中型货车、重型货车共 8 种类型; j 为污染物类型; h 为排放阶段,包括国零至国 VI 共 7 个阶段; k 为燃料类型,包括汽油、柴油和天然气(包括 CNG 和 LNG)。

1.1.2 机动车保有量 截止 2020 年 10 月底,通过机动车环保管理部门和机动车环保定期检测机构等获取唐山市 217.69 万辆机动车保有量基础数据(不含低速汽车、三轮车、摩托车和工程机械),包括车辆类型、排放阶段、注册登记日期、燃油类型、保有量等参数。

1.1.3 本地化机动车排放因子 机动车排放因子是指每单位行驶单位里程某种污染物的排放量,

g/km.考虑到实际排放测试获得的排放因子样本量较少且周期长、费用高,因此在研究中通常利用机动车排放模型进行排放因子模拟或本地化修正,常见的机动车排放模型包括 COPERT^[17], MOBILE^[18], IVE^[19]等.与 MOBILE, IVE 模型相比,COPERT 模型因采用了大量可靠的实验数据、兼容不同国家标准和参数变量、所需的数据量较少等优点,在我国不同层级管理部门的机动车排放清单编制中得到了较好的推广^[20].具体方法:

(一)通过《指南》获得国零至国V阶段、单一燃料动力类型(汽油、柴油车、天然气)车辆 CO, HC, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀ 等污染物的推荐排放因子系数.在此基础上,运用 COPERT 模型对各污染物排放因子系数进行本地化修正.COPERT 模型将机动车排放与平均速度进行关联,并基于大量不同车型实验测试数据和排放标准拟合出一系列经验公式来模拟和修正机动车排放因子.此外,COPERT 模型还需设定燃油油品、气候、单次行驶平均里程、负载和坡度等修正参数信息^[15].考虑在实际研究中,气候和单次行驶平均里程等两项本地化修正参数相对较难获取,因此研究中暂未考虑上述两因素的修正.研究中主要采用平均速度、燃油油品对排放因子进行修正,其中:通过中国汽车行驶工况国家标准^[21-22]获得不同类型轻重型汽车的平均速度数据,作为唐山市实际道路各车型的平均速度;燃油油品以唐山市市售的国VI标准汽柴油车作为基准,相关参数见表 1.结合相关经验和研究^[15],假定道路坡度均设定为 0,负载均设定为 50%.

表 1 排放因子本地化修正所需数据
Table 1 Data required for local correction of emission factors

因素	参数	取值
道路平均车速 (km/h)	微型/小型客车	28.96
	中型/大型客车	39.24
	微型/小型货车	28.96
	中型/重型货车	34.62
燃油油品(%)	汽柴油硫含量	10
道路坡度	/	0
车辆负载(%)	/	50%

(二)为获取部分国VI轻重型汽车排放因子数据,通过相关文献^[23]以及中汽研汽车检验中心(天津)有限公司承担的唐山市生态环境局《新机动车及非道

路移动机械环保一致性核查研究》等课题,选取典型新增的国VI阶段轻重汽车车型,依据 GB18352.6-2016^[24]和 HJ857-2017^[25]标准、采用车载排放测试系统^[26](PEMS,包括 SEMTECH-DS 和 ELPI)开展本地化实际道路气态污染物(CO, HC 和 NO_x)和颗粒物排放(PM_{2.5} 和 PM₁₀)测试,其中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放(包括数目和质量排放)主要通过静电低压撞击器 ELPI 进行测试获得,部分典型的国VI阶段轻重型汽车实际排放因子数据,见表 2.考虑到该部分排放因子数据是在唐山市本地测试获得的,因此研究中未进行本地化修正.

表 2 部分国VI机动车实际排放因子清单
Table 2 Emission factor list obtained from PEMS test

车辆 类型	燃料 类型	排放 阶段	排放因子(mg/km)			
			CO	HC	NO _x	PM _{2.5/10}
轻型 汽车	汽油	国 VI	190.44	6.36	3.39	0.80
	柴油	国 VI	175.80	32.34	21.9	0.53
重型 汽车	柴油	国 VI	3.5×10 ³	40.6	14.5×10 ³	47
	天然气	国 VI	1.3×10 ³	903.4	9.3×10 ³	7

注:开展实际测试过程中,未对颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀进行区分计算.

ELPI^[27]主要由串级冲击式采样器、点管式几何电晕充电器和多通道静电计等 3 部分组成,其中串级冲击式采样器利用颗粒的惯性按照动力学粒径分为 12 级(粒径范围为 0.03~10μm).每一级撞击器上由于带点颗粒连续沉积所产生的电流由一个多通道静电计测得,电流与颗粒数目浓度的关系为:

$$N = \frac{I}{P \times n \times e \times Q}$$

(2)

式中: I 为电流; P 为颗粒通过电晕的比率; n 为颗粒的基本电荷数目; e 为基本电荷电量; Q 为气溶胶流量; N 为颗粒数目浓度,个/cm³.

根据各粒径范围内平均单个颗粒的体积和密度,可以得到每一级颗粒物的质量浓度 M :

$$M = N \times \left(\frac{1}{6} \times \pi \times D_i^3 \pi \times \rho \right)$$

(3)

式中: M 为第 i 级撞击器上测得该粒径段的颗粒质量浓度, mg/m³; D_i 为颗粒的空气动力学粒径; ρ 为颗粒的密度值, kg/m³,通常假定颗粒的平均密度为 1.0kg/m³.

1.1.4 年均行驶里程 年均行驶里程(VKT)是描述机动车单车活动水平的重要参数,受区域道路工

况条件、经济水平、管控政策等因素的影响^[28]。本研究通过调查唐山市在用机动车定期环保检测数据(包括车辆类型、燃料类型、注册登记日期、检测日期、累积行驶里程),分析得到不同车辆类型的年均行驶里程数据。

通过机动车环保检测日期与初次注册登记日期,获得车龄数据:

$$n_{id} = \frac{D_{id,ins} - D_{id,reg}}{365} \quad (4)$$

式中: n 为机动车车龄, a ; id 为记录号; $D_{id,ins}$ 和 $D_{id,reg}$ 分别为机动车的检测日期与初次注册登记日期。

通过机动车累积行驶里程与车龄,获得车辆年均行驶里程数据:

$$VKT_{id} = \frac{AVKT_{id}}{n_{id}} \quad (5)$$

式中: VKT_{id} 与 $AVKT_{id}$ 分别为机动车的年均行驶里程与累积行驶里程, km。

1.2 空间分配

本研究以唐山市路网信息为基础,利用 ArcGIS 技术对机动车污染物排放量进行时空分配,进而分析其空间排放分布特征。根据机动车保有量和道路密度,将唐山市道路网切割成 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 网格,获得高分辨率的机动车网格化排放清单^[29-30]。道路机动车污染物排放强度与车流量呈正相关性^[31]。但是受地区各道路车流量数据可得性限制,因此本文在空间分配过程中并未采取真实道路车流量数据信息,而是以各网格中各类型道路长度为权重对污染物排放总量进行空间分配^[15],即计算每个网格内各类道路长度占地区道路长度的比例,将各污染物在各类道路上的总排放量按照这一比例分摊到每一网格上,并对每个网格中各类道路的污染物排放量分别求和,最终得到污染物在各网格中的排放量。每个网格中的机动车排放量分配公式为:

$$Q_{n,j} = \sum_c \frac{L_{n,c}}{L_c} \times E_{c,j} \quad (6)$$

式中: Q 为网格机动车排放量; n 为网格编号; c 为道路类型(包括城区路、郊区路和高速路); j 为污染物种类; L 为道路长度; E 为机动车排放总量。

该分配方法假定网格内包含道路长度越多,则排放量越大。尽管基于真实流量信息的空间分配更为准确,但由于在我国大多数地区道路车流量数据获取难度较大,因此本研究所采用的空间分配方法

更具操作性与普遍适用性。

1.3 机动车排放管控情景与减排经济效益

以唐山市国三及以下阶段中重型柴油车(简称“高排放车”)采用不同淘汰与治理比例为设定情景,与当前管理措施情景(基准情景)进行比较,研究分析不同情景方案对污染物减排量及经济效益(投入成本)^[9-10,29],情景设定见表 3。研究中情景设定均为单一政策,采用控制变量法,保持其他相关情景不变。

表 3 情景设定说明

Table 3 Scenario description

情景	编号	情景描述
基准情景	A	以 2020 年唐山市机动车保有量结构、管控政策和国 VI 燃油质量为基准
高排放车辆淘汰与治理	B	唐山市国三及以下中重型柴油车: $X\%$ 开展 DPF 排放治理; $(100-X)\%$ 淘汰后更换为国 VI 阶段柴油车; 注:假定 X 取值为 10~90, 10 的整数倍;

减排经济效益主要指采取不同情景方案下车辆业主(单位或个人)投入成本与机动车污染物减排量的比值,用来衡量减排措施方案中环境效益和经济效益,为管理部门制定机动车排放治理或淘汰等管控政策提供支撑^[32]。研究中,为定量评估“减排-经济”效益,根据《唐山市重型柴油车污染治理工作方案》^[33]等相关资料提出以下假设条件:

(1)车辆业主采用加装 DPF 排放治理方式,中型和重型柴油车治理费用 F_{DPF} 分别 1.5 和 2 万元/辆,可以延长车辆使用年限 N 为 3 年、且减排效率不降低。业主单车年投入成本 $F_{DPF-Avg}$:

$$F_{DPF-Avg} = \frac{F_{DPF}}{N} \quad (7)$$

式中: F_{DPF} 为高排放车业主进行排放治理的投入成本,万元; N 为排放治理后车辆使用年限, a ; $F_{DPF-Avg}$ 为排放治理后车辆使用年限内的业主年均投入成本,万元/a。

(2)淘汰高排放车后车辆业主获得国家平均补贴费用 F_{sub} 为 1.8 万元/辆,同时业主购置国 VI 阶段同类型中重型柴油车费用 F_{pur} 分别为 15 和 35 万元/辆,车辆使用年限 N 为 10a、且车辆排放没有劣化。业主单车年投入成本 $F_{pur-Avg}$:

$$F_{\text{pur-Avg}} = \frac{(F_{\text{pur}} - F_{\text{sub}})}{N} \tag{8}$$

式中: F_{sub} 为业主淘汰高排放车后获得国家补贴费用,万元; F_{pur} 为业主购置国VI阶段同类型车辆的投入成本,万元; N 为购置新车的使用年限,a; $F_{\text{pur-Avg}}$ 为淘汰购置新车在使用年限内的业主年均投入成本,万元/a.

2 结果与讨论

2.1 唐山市机动车保有量结构特征

由表 4 可见:目前唐山市机动车以小型载客汽油车为主,占总保有量的 82.79%,其中国IV和国V阶段占 78.15%;其次轻型载货和重型载货柴油车占 9.20%,以国III和国IV阶段为主,占其保有量 97.08%.

天然气汽车保有量仅占 0.94%,微型载客和小型载客以国 IV 和国 V 阶段为主;而中重型载客以国 V 阶段为主,占其保有量 86.42%.

自 2019 年 7 月 1 日起,河北省实施机动车国六排放标准.从国VI阶段结构来看,新增车辆主要集中在小型载客(汽油车和新能源)、轻型载货汽油车、重型载货天然气车,累计新增量占保有量 3.4%.

根据《唐山市 2019 年国民经济和社会发展统计公报》^[34]中全市常住人口 796.4 万计算,唐山汽车拥有水平(通常以千人汽车保有量来衡量,单位:辆/千人)约为 273 辆/千人,远高于 2019 年世界银行公布的中国千人汽车拥有量 173 辆/千人,这也就意味着唐山地区机动车年均行驶里程会相对较低.

表 4 唐山市不同车辆类型、排放阶段保有量比例分布
Table 4 Proportion distribution of vehicle ownership in different vehicle types and emission stages in Tangshan City

车辆及燃料类型	总数	总占比(%)	国零(%)	国 I (%)	国 II (%)	国III(%)	国IV(%)	国 V (%)	国VI(%)
微型载货-G	304	0.01	45.07	33.22	9.54	11.84	0	0.33	0
轻型载货-G	65180	2.90	0.51	1.46	7.24	13.79	27.76	41.67	7.57
中型载货-G	65	0	36.92	4.62	43.08	13.85	1.54	0	0
重型载货-G	90	0	11.11	5.56	44.44	38.89	0	0	0
微型载货-D	6	0	16.67	16.67	50	16.67	0	0	0
轻型载货-D	90623	4.03	0.04	0.31	1.10	45.89	24.59	26.29	1.78
中型载货-D	8814	0.39	0.50	0.56	4.75	62.48	15.45	15.78	0.48
重型载货-D	116202	5.17	0.02	0.12	2.15	33.70	26.32	37.37	0.34
微型载货-C	2	0	0	0	0	0	100	0	0
轻型载货-C	1215	0.05	0.16	0	0.16	0.58	37.04	60.99	1.07
中型载货-C	58	0	1.72	0	0	0	0	98.28	0
重型载货-C	16122	0.72	0	0	0	0.76	22.01	65.90	11.33
微型载客-G	54969	2.44	7.70	22.76	15.68	26.05	24.85	2.95	0
小型载客-G	1862527	82.79	0.03	0.88	5.17	12.38	37.73	40.42	3.38
中型载客-G	862	0.04	2.44	4.06	14.50	30.74	39.21	8.93	0.12
重型载客-G	277	0.01	2.53	2.89	33.21	24.55	36.82	0	0
小型载客-D	6306	0.28	0.03	0.52	2.71	45.48	28.81	21.08	1.36
中型载客-D	1531	0.07	0.07	0.72	2.55	49.05	29.85	17.31	0.46
大型载客-D	3537	0.16	0.06	0.23	2.23	50.98	29.94	16.31	0.25
微型载客-C	877	0.04	31.24	0	0	0	31.24	37.51	0
小型载客-C	18159	0.81	3.84	0.04	1.11	0.18	41.82	45.88	7.13
中型载客-C	49	0	0	0	0	0	8.16	91.84	0
重型载客-C	2008	0.09	0	0	0	12.50	6.57	80.93	0

注: 燃料类型, G—汽油;D—柴油;C—天然气.

2.2 年均行驶里程活动特征

利用唐山市机动车定期环保检测数据得到不同车辆类型的实际行驶里程数据,即微型客车、小型客车、中型客车、大型客车、微型货车、轻型货车、中型货车、重型货车的年均行驶里程分别为 7635, 13474, 23635, 41216, 20336, 16775, 24256,

46587km.与《指南》中相对应车型的年均行驶里程推荐值进行对比,实际年均行驶里程分别降低 57.6%, 25.1%, 24.5%, 28.9%, 32.2%, 44.1%, 30.7%, 37.9%(图 1).

与《指南》推荐值相比,货车年均行驶里程减少幅度较大,其中:微型和小型货车年均行驶里程主要

受区域庞大物流网络的影响,导致其货物以网点与网点之间的短途运输为主;中型和重型货车年均行驶里程低于推荐值 30.7%和 37.9%,其主要原因是自国家提出京津冀及周边地区推进钢铁、煤炭大宗货物运输“公转铁”战略后,唐山市全面实施曹妃甸港区和京唐港区疏港矿石“公转铁”项目,有效地减少了道路车辆运输量^[35].载客汽车年均行驶里程减少主要受城市公共交通网络建设、网约车与共享单车推广应用等因素的影响.由此可以看出,本地化的车辆年均行驶里程受地方产业、政策、经济等多种因素的影响较大.

为精细化研究唐山市城区内出租车、环卫车、邮政车、渣土运输车、公交车等五类重点行业车辆的实际运行里程与车龄间关系,每类车型随机选择 300 辆的定期环保检测数据,以车辆登记注册年份作为基准进行统计分析,获得各车型的年均行驶里程

分别为 90778, 19452, 24884, 9145, 38848km,并分别建立“里程-注册年”特征曲线,见图 2.

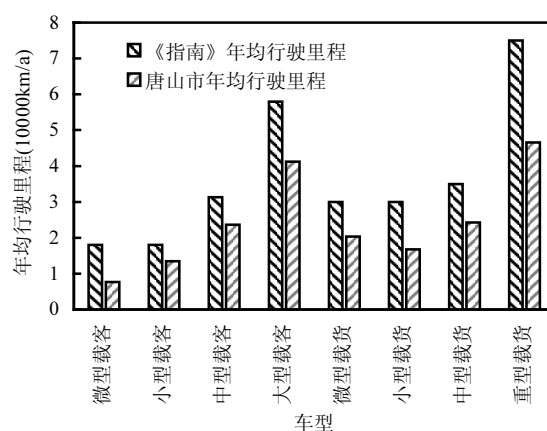


图 1 唐山市不同车型年均行驶里程与《指南》推荐值对比

Fig.1 Comparison between the average annual mileage of different vehicle types in Tangshan and the recommended value

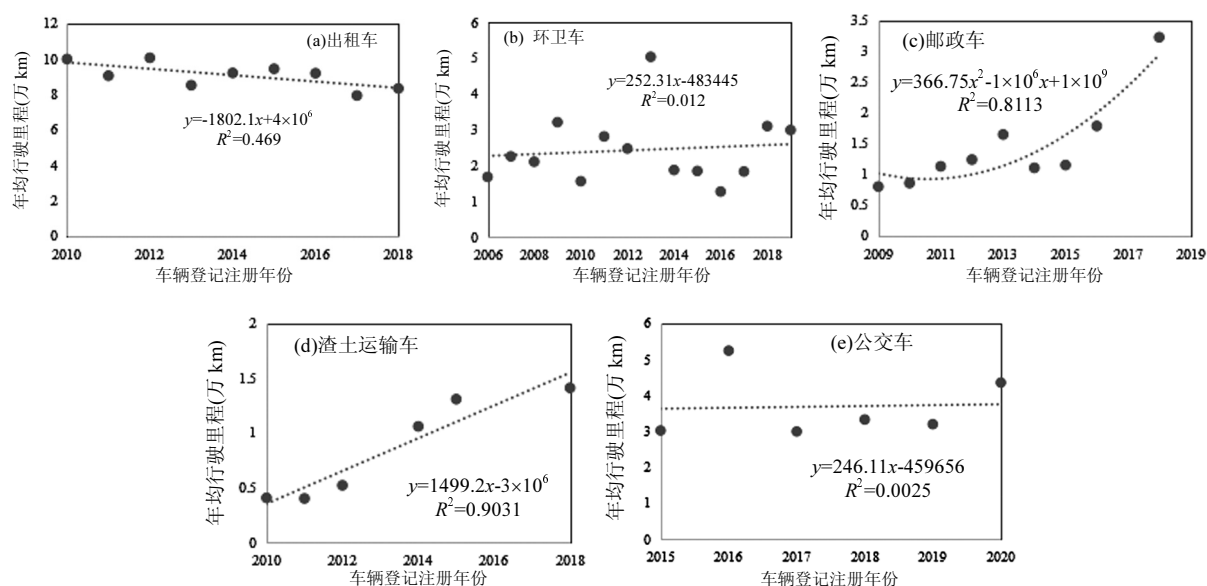


图 2 城区内典型车辆行驶里程与登记注册年曲线特征

Fig.2 Characteristics of typical vehicle mileage and age curve in urban area

与《指南》中出租车年均行驶里程推荐值 12 万公里相比,唐山市 2010~2018 年登记注册的出租车年均行驶里程约为 10~8 万 km,年均行驶里程呈下降趋势,其主要原因包括两方面:一是随着私人乘用车普及,乘坐出租车的需求量逐步减少;二是城市网约车的推广应用,也直接影响出租车的使用.

2006~2018 年登记注册的环卫车年均行驶里程

较为均匀,1.8~3 万 km/a.邮政车和渣土运输车随着车辆登记注册时间升高,车辆年均行驶里程也逐步增加,分别达到 3 万 km/a 和 1.5 万 km/a,主要原因是随着车龄增长,机动车使用频率会逐步下降;另一方面是受环保政策影响,车龄大的机动车通常排放标准较低而严格限制使用.公交车年均行驶里程约为 38848km/a,明显低于《指南》中公交车年均行驶里

程推荐值 6 万 km,导致其年均行驶里程下降的主要原因与出租车一致.

2.3 机动车排放量清单

以 2020 年 10 月底唐山市机动车保有量为基础,基于本地化的机动车综合排放因子和实际的年均行驶里程数据,建立唐山市机动车排放量清单,其中:2020 年全市机动车 CO, HC, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀ 的年排放量分别为 92403.51, 10034.53, 70568.35, 2036.51, 2160.65t.

由表 5 可见,唐山市机动车 NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放主要来源于柴油车,其中:柴油车在 NO_x 排放量中占比高达 91.92%,在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放分担率分别达到 87.52%和 87.56%.汽油车排在 CO 和 HC 排放量的分担率分别达 72.53%和 74.81%,其中重型和小型柴油车为 NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放的首要 and 次要污染源,小型载客汽油车和重型载货柴油车是 CO 和 HC 排放的首要 and 次要污染源.

表 5 不同车型和燃料类型机动车排放分担率
Table 4 Emission sharing rate of different vehicle types and fuel types

车辆类型	CO	HC	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀
微型载客 C	5.52%	5.40%	0.58%	0.47%	0.49%
微型载客 D	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
微型载客 G	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
小型载客 C	51.41%	54.38%	5.06%	8.91%	8.75%
小型载客 D	0.02%	0.03%	0.15%	0.22%	0.22%
小型载客 G	0.36%	0.44%	0.04%	0.04%	0.04%
中型载客 C	0.35%	0.30%	0.04%	0.03%	0.04%
中型载客 D	0.11%	0.18%	0.23%	0.32%	0.33%
中型载客 G	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
大型载客 C	0.29%	0.24%	0.05%	0.06%	0.06%
大型载客 D	1.09%	0.41%	2.86%	3.43%	3.42%
大型载客 G	0.07%	0.16%	0.10%	0.03%	0.03%
微型载货 C	0.09%	0.30%	0.03%	0.03%	0.03%
微型载货 D	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
微型载货 G	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
小型载货 C	9.60%	8.53%	1.05%	0.83%	0.91%
小型载货 D	4.36%	7.41%	11.15%	10.97%	11.03%
小型载货 G	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
中型载货 C	0.53%	0.37%	0.05%	0.07%	0.08%
中型载货 D	0.81%	0.79%	2.84%	2.77%	2.82%
中型载货 G	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
重型载货 C	4.75%	5.29%	1.08%	2.00%	2.00%
重型载货 D	20.66%	15.75%	74.70%	69.81%	69.75%
重型载货 G	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

从全市情况来看,小型汽油客车在 CO 和 HC 排放量的分担率最大,分别占 51.41%和 54.38%.重型柴

油货车 NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放量分担率最高,分别占 74.70%,69.81%和 69.75%,远高于其他车型;在 CO 和 HC 排放量分担率中分别贡献了 20.66%和 15.75%.小型载货柴油车在 NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放量的分担率分别为 11.15%、10.97%和 11.03%.

图 3 为唐山市机动车排放量不同排放标准下的分担率.从全市来看,由于柴油车保有量较大,国III阶段柴油车对各类排放污染物中分担率最大.对于所有燃油车,国III阶段车辆在 NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 排放中分担率最大,均超过 50%.CO 与 HC 排放分担率分布情况类似,均为国 I 阶段占比最大,接近 30%,其次为国III和国IV阶段车辆占比 20%左右.

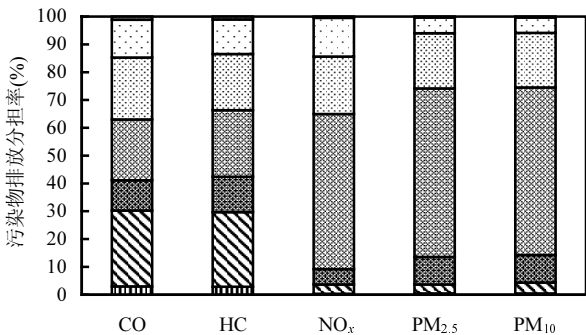


图 3 不同排放阶段机动车的排放分担率
Fig.3 Vehicle emission rate under different emission standards

对不同排放阶段的高排放车排放分担率占比进一步分析,发现:重型载货柴油车在不同排放阶段中均为 NO_x 排放量占比最大,其次是 CO 排放;国III阶段重型载货柴油车对于各类型排放物分担率均为最大.小型载客汽车在不同排放阶段中 CO 排放分担率占比均为最多,占比在 80%左右,其中国 I 和国 IV 阶段小型载客汽车排放量分担率约为 50%~65%.

2.4 机动车污染物空间分布特征

基于唐山市机动车排放清单和路网数据,利用 ArcGIS 技术,建立唐山市机动车污染物 3km×3km 网格时空排放清单. 2020 年 2 月 12 日唐山市人民政府发布通告^[36]要求国 IV 及以下排放阶段柴油货车禁止在二环路合围区域行驶(简称限行区政策),图 4 和图 5 分别是限行区政策实施前后 CO, HC, NO_x, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染物排放的空间分布对比.

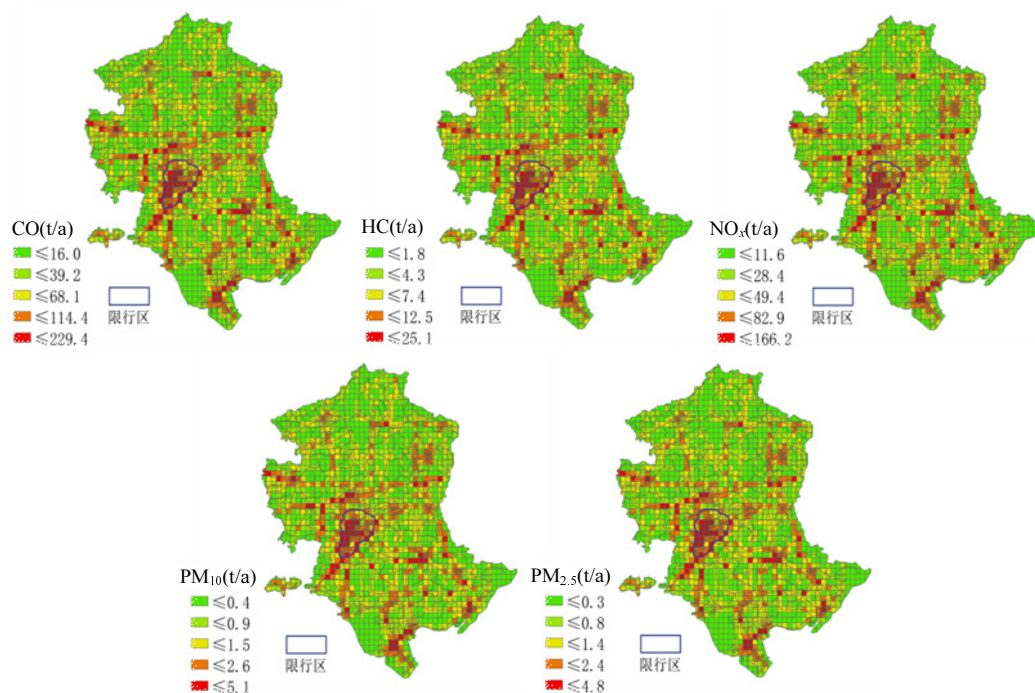


图4 唐山市实施限行区政策前排放空间分布

Fig.4 Spatial distribution of emissions before the implementation of the prohibition policy in Tangshan City

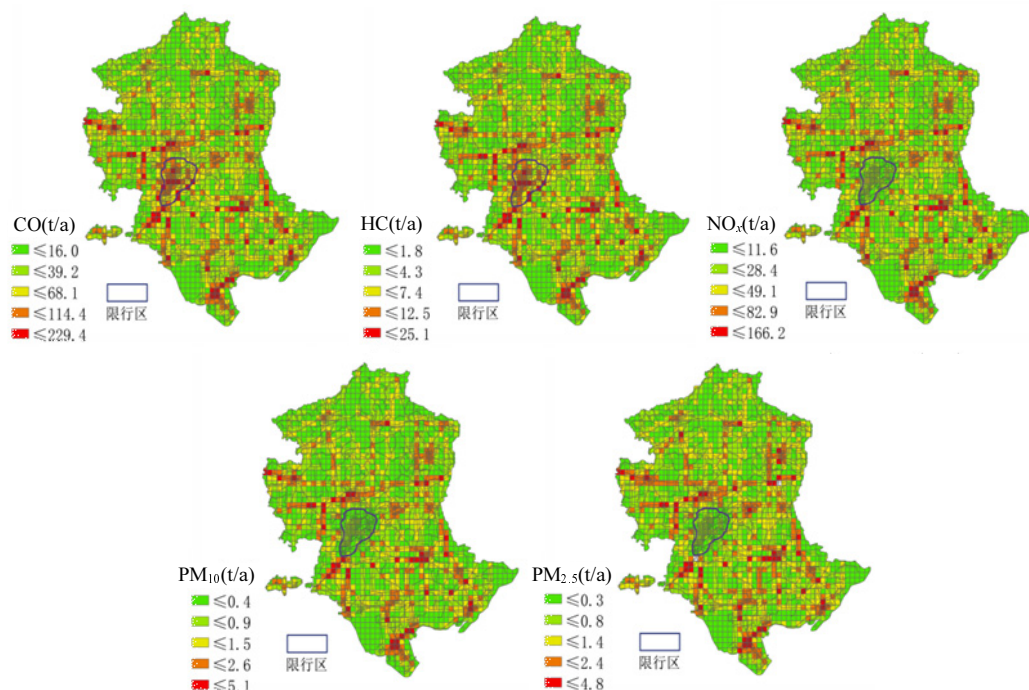


图5 唐山市实施限行区政策后排放空间分布

Fig.5 Spatial distribution of emissions after the implementation of the prohibition policy in Tangshan City

由图 4 可见:唐山市机动车污染物主要分布于交通网络密集区域以及主要交通运输通道上,排放强度整体呈现出从市中心向城市外圈排放强度逐渐降低的趋势,同时曹妃甸区域以及由曹妃甸区域向唐山市其他区域的主要运输通道污染排放较高,

主要因港区运输车辆相对集中以及港口钢铁、煤炭运输等原因所导致.对比图 5 和图 6 可以看出:唐山市实施限行区政策后,二环及以内 CO 和 HC 排放强度降低略小,年排放量削减率分别为 22.41%和 21.68%;而 NO_x, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染物排放强度显著

降低,年排放量削减率分别为 78.60%,84.85%和 84.79%,这也进一步验证了国Ⅳ及以下阶段柴油货车是唐山市城区内 NO_x 和 PM 排放的污染源.因此,在交通密集区域以及主要运输通道制定柴油货车限行或绕行等政策能够有效降低城市内机动车污染物排放^[37].与此同时,国Ⅳ及以下阶段柴油货车将通过二环外各主要运输通道绕行,导致 CO, HC, NO_x, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染物年排放量也相应比例的增加,由于全市各主要运输通道多且较长,以及研究中主要根据各类型道路长度为权重对污染物排放总量进行空间分配,因此实施限行区政策后二环外道路污染物排放未出现突增的现象.

2.5 减排/经济效益情景分析

2.5.1 高排放车辆淘汰与治理情景 按照唐山市相关^[33]要求,截至 2020 年 12 月底唐山市已完成 1126 辆国三中重型柴油货车开展加装柴油颗粒物捕集器(DPF)系统(含柴油催化转化器 DOC)排放治理(以下简称 DPF 排放治理)试点示范.

相比于颗粒物质量测量,通过颗粒物数量(PN)浓度测试能够更好地评估 DPF 的过滤效率.因此,在加装 DPF 前、以及加装后车辆运行(1000±100) km 时,唐山市环境监控中心利用中国科学院合肥物质科学研究院自主研发的便携式 PN 测试设备对 1126 辆加装 DPF 的国三中重型柴油货车进行 PN 数量浓度测试,得到不同车辆类型 DPF 对 PN 排放平均过滤效率为 98.48%,结果表明加装 DPF 能够有效地降低柴油车颗粒物排放.通过文献调研^[38],DPF 系统中 DOC 对 CO 和 HC 排放削减率分别不低于 70%和 80%.高排放车淘汰后购置新生产的国Ⅵ排放阶段中重型柴油车,通过两个标准阶段各污染物限值对比能够简便、快速得到淘汰购置新车的污染物减排率.以单车排放因子计算,CO, HC, NO_x 和 PM 单车排放因子削减率分别为 33%, 45%, 31%, 77%.考虑当前天津、唐山等部分省市正在推行的柴油车 DPF 排放治理措施以及国家在京津冀及周边地区淘汰国三及以下运营中重型柴油货车 100 万辆的任务,业主可根据实际需求选择加装 DPF 排放治理或淘汰后购置国Ⅵ阶段柴油车等两种措施来满足柴油车排放管控要求,即高排放车淘汰与治理情景 B.

根据前面情景设定,不同淘汰与治理比例情景

下各污染物年减排量 E_{Total} :

$$E_{Total-v} = X \times E_{DPF-v} + (100\% - X) \times E_{pur-v} \tag{9}$$

式中: X 为 DPF 排放治理比例, X 取值为 10~90%, 10%的整数倍; v 为污染物类型, CO, HC, NO_x 和 PM; E_{DPF} 为 DPF 排放治理后污染物减排量, t; E_{pur} 为淘汰后购置新车的年减排量, t.

2.5.2 “减排-经济”效益分析 基于上述已假设 DPF 排放治理和淘汰购置新车两种情景下车辆业主投入成本、国家相关补贴以及相对应的车辆使用年限条件,得到中重型柴油车排放治理或淘汰情景下车辆业主年均投入成本,见表 6.通过加装 DPF 排放治理措施,业主单车年均投入成本仅为淘汰购置投入成本的 0.2~0.37 倍,从经济效益角度看,业主更倾向采用排放治理方式进行排放升级.

表 6 不同情境下业主单车年均投入成本(万元/a)

Table 6 Annual average input cost in different situations

车辆类型	淘汰后购置新车 年均投入成本(万元/a)	加装 DPF 排放治理 年均投入成本(万元/a)
中型车辆	1.32	0.50
重型车辆	3.22	0.67

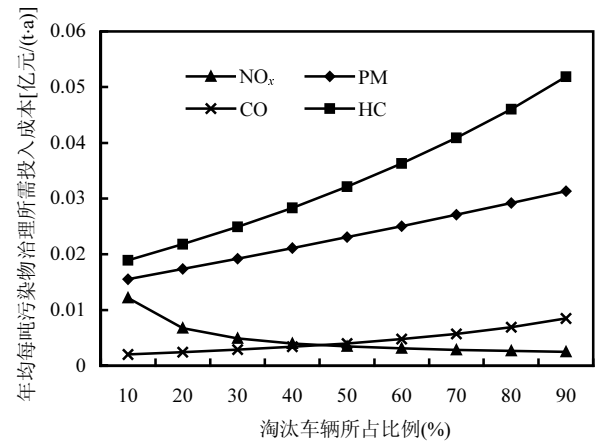


图 6 不同淘汰比例下各污染物减排所需投入成本
Fig.6 Cost of emission reduction in different elimination proportion

由图 6 可见,随着高排放车淘汰比例的增长,NO_x减排所需投入成本呈逐渐下降的趋势;PM, CO, HC 等污染物单位减排量所投入成本呈逐渐上升的趋势,DPF 排放治理措施下 PM, CO, HC 减排经济效益更有优势.随着淘汰比例由 10%升至 90%,单位年吨的 HC 和 CO 减排费用将分别由 0.02 亿元上升至

0.05 亿元和 0.08 亿元;单位年吨的 PM 减排费用将由 0.015 亿元上升至 0.03 亿元.分析其主要原因包括两个方面:(1)DPF 治理能够大幅降低 PM 排放,对 CO 和 HC 排放起到一定的减排效果,但对 NO_x 几乎没有减排作用;(2)将国三及以下阶段柴油车淘汰购置国 VI 车辆后,能够不同程度地削减 CO, HC, NO_x 和 PM 等四种污染物排放,但 NO_x 减排率最低.

由图 7 可见,随着高排放淘汰比例的增长,投入成本和 NO_x 年均减排量呈线性上升趋势,且 NO_x 减排效果更加显著,即通过淘汰购置新车能够明显降低 NO_x 排放,而 PM 减排辆略呈下降趋势,主要原因是 DPF 排放治理对 PM 排放削减率较高.为进一步量化不同情境下的 PM 和 NO_x 两种污染物的“减排量-投入成本”关系,发现:高排放车淘汰比例每增长 10%, NO_x 年均减排量增加 892.41t, PM 年均减排量减少 7.56t,年投入成本增加 1.13 亿元.

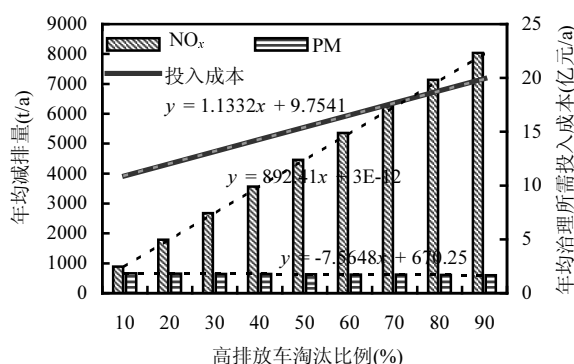


图 7 不同淘汰比例下年均污染物减排量与投入成本
Fig.7 Annual pollutant emission reduction and input cost under different elimination ratio

3 结论

3.1 与《指南》中相对应车型的推荐值进行对比,唐山市微型客车、小型客车、中型客车、大型客车、微型货车、轻型货车、中型货车、重型货车的年均行驶里程分别降低 57.6%, 25.1%, 24.5%, 28.9%, 32.2%, 44.1%, 30.7%, 37.9%, 主要受“公转铁”运输结构调整、物流网络建设、私家车和网约车普及应用等因素影响.

3.2 按车辆类型,微小型载客汽车的 CO 和 HC 排放分担率最高,分别达到 51.41%和 54.38%; NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放的首要贡献车型为重型载货车,其分担率分别 74.70%、69.81%和 69.75%.按排放标准,国 III

阶段柴油车各类污染物排放分担率最高,特别是 NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 均超过 50%.

3.3 唐山市实施国 IV 及以下阶段柴油货车在二环路限行后,限行区内 CO 和 HC 年排放量削减率为 22.41%和 21.68%,而 NO_x , PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物年排放量削减率分别为 78.60%, 84.85%和 84.79%.

3.4 随着高排放车淘汰比例的增长,投入成本和 NO_x 年均减排量呈线性上升趋势,且 NO_x 减排效果更加显著,而 PM 减排辆略呈下降趋势.高排放车淘汰率每增长 10%, NO_x 年均减排量增加 892.41t, PM 年均减排量减少 7.56t,年投入成本增加 1.13 亿元.

参考文献:

- [1] 卢亚灵,周佳,程曦,等.京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 [J]. 环境科学, 2018,39(6):2566-2575.
Lu Yaling, Zhou Jia, Cheng Xi, et al. Evaluation of total emission reduction benefits of yellow standard vehicle policy in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Environmental Science, 2018,39(6):2566-2575.
- [2] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, et al. Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Atmospheric Environment, 2015,113:247-254.
- [3] Zhang Qing-yu, Wei Yu-mei, Tian Wei-li, et al. GIS based emission inventories of urban scale: A case study of Hangzhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2008,42:5150-5165.
- [4] 潘玉瑾,李媛,陈军辉,等.基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 [J]. 环境科学, 2020,41(8):3581-3590.
Pan Yujin, Li Yuan, Chen Junhui, et al. Establishment of high-resolution vehicle emission inventory in Chengdu based on traffic flow [J]. Environmental science, 2020,41(8):3581-3590.
- [5] Sun S, Jin J, Xia M, et al. Vehicle emissions in a middle-sized city of China: Current status and future trends [J]. Environment International, 2020,137:105514-105527.
- [6] 张少君.中国典型城市机动车排放特征与控制策略研究 [D]. 北京:清华大学, 2014.
Zhang Shaojun. Research on vehicle emission characteristics and control strategies in typical cities in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [7] Zhang Q, Sun G, Fang S, et al. Air pollutant emissions from vehicles in China under various energy scenarios [J]. The Science of the Total Environment, 2013,450-451:250-258.
- [8] 孙世达,金嘉欣,吕建华,等.基于精细化年均行驶里程建立机动车排放清单 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):2018-2029.
Sun Shida, Jin Jiaxin, LV Jianhua, et al. Establishment of vehicle emission inventory based on refined average annual driving mileage [J]. China Environmental Science, 2020,40(5):2018-2029.
- [9] 樊守彬,郭津津,李雪峰.基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 [J]. 环境科学, 2018,39(8):3571-3579.
Fan Shoubin, Guo Jinjin, Li Xuefeng. Motor vehicle pollution control scenario of Beijing Sub Center Based on road network traffic flow [J]. Environmental science, 2018,39(8):3571-3579.
- [10] 金嘉欣,孙世达,王凡,等.辽宁省 2000-2030 年机动车排放清单及情景分析 [J]. 环境科学, 2020,41(2):665-673.
Jin Jiaxin, sun Shida, Wang Peng, et al. Vehicle emission inventory and scenario analysis of Liaoning Province from 2000 to 2030 [J]. Environmental science, 2020,41(2):665-673.
- [11] Perugu H, Wei H, Yao Z. Developing high-resolution urban scale

- heavy-duty truck emission inventory using the data-driven truck activity model output [J]. *Atmospheric Environment*, 2017,155:210-230.
- [12] Pahlvik S, eggleston-N. goriben, et al. COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport Methodology and emission factors (Version2.1) [M]. Copenhagen: EEA, 2000:14-20.
- [13] 生态环境部.道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [Z]. 生态环境部, 2014.
- Ministry of ecological environment. Technical guide for the preparation of air pollutant emission inventory of road motor vehicles (for Trial Implementation) [Z]. Ministry of ecological environment, 2014.
- [14] Chart-asa C, Gibson J M. Health impact assessment of traffic-related air pollution at the urban project scale: influence of variability and uncertainty [J]. *Science of the Total Environment*, 2015,506/507:409-421.
- [15] 孙世达,姜 巍,高卫东.青岛市机动车排放清单与空间分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(1):49-59.
- Sun Shida, Jiang Wei, Gao Weidong. Emission inventory and spatial distribution characteristics of motor vehicles in Qingdao [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(1):49-59.
- [16] 王志伟,刘士光.唐山市在用重型柴油车排放清单研究 [J]. *中国环保产业*, 2020.
- Wang Zhiwei, Liu Shiguang. Study on emission inventory of in-service heavy diesel vehicles in Tangshan [J]. *China's environmental protection industry*, 2020.
- [17] 傅立新,贺克斌,何东全,等.MOBILE 汽车源排放因子计算模式研究 [J]. *环境污染与防治*, 2009,31(9):89-94.
- Fu Lixin, he Kebin, he Dongquan, et al. Study on calculation model of mobile vehicle source emission factor [J]. *Environmental pollution and prevention*, 2009,31(9):89-94.
- [18] 谢绍东,宋翔宇,申新华.应用 COPERT III模型计算中国机动车排放因子 [J]. *环境科学*, 2006,27(3):415-419.
- Xie Shaodong, song Xiangyu, Shen Xinhua. Calculation of vehicle emission factors in China using COPERT III model [J]. *Environmental science*, 2006,27(3):415-419.
- [19] 姚志良,贺克斌,王岐东,等. IVE 机动车排放模型应用研究 [J]. *环境科学*, 2006,27(10):1928-1933.
- Yao Zhiliang, he Kebin, Wang Qidong, et al. Application of IVE vehicle emission model [J]. *Environmental Science*, 2006,27(10):1928-1933.
- [20] 蔡 皓,谢绍东.中国不同排放标准机动车排放因子的确定 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010,46(3):319-326.
- Cai Hao, Xie Shaodong. Determination of vehicle emission factors with different emission standards in China [J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2010,46(3):319-326.
- [21] GB/T 38146.1-2019 中国汽车行驶工况 第 1 部分:轻型汽车 [S].
- GB/T 38146.1-2019 driving cycle of motor vehicles in China Part 1: light vehicles [S].
- [22] GB/T 38146.2-2019 中国汽车行驶工况 第 2 部分:重型商用车 [S].
- GB/T 38146.2-2019 driving cycle of motor vehicles in China Part 2: heavy commercial vehicles [S].
- [23] 罗长亮,郭晓鑫,马 毅,等.不同工况循环下的轻型汽车排放和油耗特性研究 [J]. *小型内燃机与车辆技术*, 2019,48(6):1-5.
- Luo Changliang, Guo Xiaoxin, Ma Yi, et al. Study on emission and fuel consumption characteristics of light vehicles under different working cycles [J]. *Small internal combustion engine and vehicle technology*, 2019,48(6):1-5.
- [24] GB18352.6-2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S].
- GB18352.6-2016 emission limits and measurement methods of pollutants from light vehicles (China phase VI) [S].
- [25] HJ857-2017 重型柴油车、气体燃料车排气污染物车载测量方法和技术要求 [S].
- HJ857-2017 on-board measurement methods and technical requirements for exhaust pollutants of heavy diesel vehicles and gas fuel vehicles [S].
- [26] Liu Z, Ge Y, Johnson K C, et al. Real-world operation conditions and on-road emissions of Beijing diesel buses measured by using portable emission measurement system and electric low-pressure impactor [J]. *Sci Total Environ*, 2011,409(8):1476-1480.
- [27] Goel R, Guttikunda S K. Evolution of On-road Vehicle Exhaust Emissions in Delhi [J]. *Atmospheric Environment*, 2015,105:78-90.
- [28] Huo H, Zhang Q, He K B, et al. Vehicle-use intensity in China: current status and future trend [J]. *Energy Policy*, 2012,43:6-16.
- [29] 杨 雯,王学军,张倩茹.基于高精度清单的京津冀机动车控污政策研究 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2803-2810.
- Yang Wen, Wang Xuejun, Zhang Qianru. Research on motor vehicle pollution control policy in Beijing, Tianjin and Hebei based on high-precision inventory [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(8):2803-2810.
- [30] Cheng Y, Chen Y Y, Liu Y, et al. An method of high-resolution of urban traffic emission for pollution control: a case study in Beijing [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018,18(2):236-244.
- [31] 樊守彬,田灵娣,张东旭,等.基于实际道路交通信息的北京市机动车排放特征 [J]. *环境科学*, 2015,36(8):2750-2757.
- Fan shoubin, Tian Lingdi, Zhang Dongxu, et al. Emission characteristics of motor vehicles in Beijing based on actual road traffic flow information [J]. *Environmental science*, 2015,36(8):2750-2757.
- [32] 周 昱,吴 烨,林博鸿,等.北京市压缩天然气公交车的环境效果分析 [J]. *环境科学学报*, 2010,30(10):1921-1925.
- Zhou Yu, Wu ye, Lin Bohong, et al. Environmental effect analysis of compressed natural gas buses in Beijing [J]. *Journal of environmental science*, 2010,30(10):1921-1925.
- [33] 唐山市生态环境局.唐山市重型柴油车污染治理工作方案 [EB/OL]. 唐山:唐山市人民政府(2020-7-22).
- Tangshan Ecological Environment Bureau. Work plan for pollution control of heavy diesel vehicles in Tangshan [EB/OL]. Tangshan: Tangshan Municipal People's Government (July 22, 2020).
- [34] 唐山劳动日报.唐山市 2019 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. 唐山:唐山劳动日报(2020-4-2).
- Tangshan labor daily. Statistical bulletin of national economic and social development of Tangshan in 2019 [EB/OL]. Tangshan: Tangshan labor daily (2020-4-2).
- [35] 冯明明.“公转铁”政策下进口铁矿石疏港方式转变的经济环境影响研究 [D]. 大连海事大学, 2020.
- Feng Mingming. Study on the economic and environmental impact of the transformation of port dredging mode of imported iron ore under the "public to iron" policy [D]. Dalian Maritime University, 2020.
- [36] 唐山市人民政府.关于市中心禁止使用高排放机动车的通告 [EB/OL]. 唐山:唐山市人民政府(2020-2-12).
- Tangshan Municipal People's Government. Notice on banning the use of high emission motor vehicles in the city center [EB/OL]. Tangshan: Tangshan Municipal People's Government (February 12, 2020).
- [37] Zhang S J, Niu T L, Wu Y, et al. Fine-grained vehicle emission management using intelligent transportation system data [J]. *Environmental Pollution*, 2018,241:1027-1037.
- [38] 中国环境保护产业协会.柴油车排气后处理装置技术要求第 3 部分:柴油颗粒捕集器(DPF) [Z]. 中国环境保护产业协会, 2017.
- China Association of Environmental Protection Industry. Technical requirements for diesel vehicle exhaust aftertreatment device part 3: diesel particulate filter (DPF) [Z]. China Environmental Protection Industry Association, 2017.

作者简介: 王计广(1986-),男,河北唐山人,博士,高级工程师,主要研究方向为机动车污染防治技术与排放清单模型.发表论文 20 余篇。