

引用格式:郭秀锐,姚畅,刘瑶,等. 京津冀地区柴油移动燃烧源污染减排潜力预测[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(6): 733-747.

GUO X R, YAO C, LIU Y, et al. Prediction of pollution reduction potential of diesel mobile combustion sources based on scenario analysis—a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(6): 733-747. (in Chinese)

# 京津冀地区柴油移动燃烧源污染减排潜力预测

郭秀锐, 姚畅, 刘瑶, 宁春晓, 吴洪侃

(北京工业大学环境与生命学部区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 包含柴油车辆和柴油机械的柴油移动燃烧源是现阶段中国进一步持续改善空气质量的重点源。为探究京津冀地区柴油移动燃烧源的污染排放以及减排潜力,在估算2018年京津冀地区柴油车辆和柴油机械污染排放现状的基础上,设置基准情景和5种政策情景,预测2019—2030年不同情景下柴油燃烧源的污染排放趋势,对比分析不同地区、不同源的污染物减排潜力和不同减排措施对不同类型柴油燃烧源的减排效果。结果表明,京津冀地区2018年柴油燃烧源的CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM排放量分别为51.25、22.89、106.52和5.42万t。综合情景下,2030年CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM污染物排放量可分别比基准年减少52.03%、38.58%、71.88%和52.07%。淘汰高排放情景在短时间内的减排效果较好,而长期效果不佳,提升排放标准情景和推广新能源情景的减排潜力会逐年增加,对污染物有较好的减排作用,运输公转铁情景的减排潜力也较好,2030年能有效减少35.13%~45.81%的污染排放。综合情景下柴油车辆和柴油机械的最大减排潜力分别为91.55%和44.69%。此外,CO和NO<sub>x</sub>的减排潜力主要来源于柴油车辆,而柴油机械对HC和PM的减排效果明显。与其他2个地区相比,天津市的污染减排效果较好,最大减排潜力为80.80%。分类型来看,柴油货车对污染物的减排贡献较大,尤其是重型货车。与工程机械相比,农业机械的污染减排贡献更大,尤其是联合收割机、农用水泵以及三轮车的减排贡献突出。研究结果可为制定柴油移动源的污染控制政策提供科学支持。

**关键词:** 柴油车辆; 柴油机械; 大气污染物; 情景分析; 减排潜力; 京津冀地区

中图分类号: X 32

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2024)06-0733-15

doi: 10.11936/bjtxb2022100008

## Prediction of Pollution Reduction Potential of Diesel Mobile Combustion Sources Based on Scenario Analysis —A Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Region

GUO Xiurui, YAO Chang, LIU Yao, NING Chunxiao, WU Hongkan

(Beijing Key Laboratory of Regional Air Pollution Control, Faculty of Environment and Life,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Diesel mobile combustion sources, including diesel vehicles and diesel machinery, are the key sources for further sustainable air quality improvement in China at this stage. To explore the pollution emissions of diesel mobile combustion sources in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region and their

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978011)

作者简介: 郭秀锐(1976—), 女, 副教授, 主要从事大气污染防治与能源政策、环境规划与管理方面的研究, E-mail: guoxiurui@bjut.edu.cn

emission reduction potential, this paper set up a baseline scenario and five policy scenarios based on estimating the current status of diesel vehicle and diesel machinery pollution emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018, predicted the pollution emission trends of diesel combustion sources under different scenarios from 2019 to 2030, and compared and analyzed the pollutant emission reduction potential of different regions and sources. Results show that the emission reduction potential of diesel combustion sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2019–2030 will be reduced and the emissions of CO, HC, NO<sub>x</sub> and PM from diesel combustion sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 are 512 500 t, 228 900 t, 1 065 200 t and 54 200 t, respectively. The combined scenario can reduce CO, HC, NO<sub>x</sub> and PM pollutant emissions in 2030 by 52.03%, 38.58%, 71.88% and 52.07%, respectively, compared with that in the base year. The emission reduction effect of the scenario of phasing out high emissions is more effective in a short period of time, while the long-term effect is less effective. The emission reduction potential of the scenario of improving emission standards and promoting new energy will increase year by year, which has a better emission reduction effect on pollutants, and the emission reduction potential of the scenario of transporting public to railway is also better, which can effectively reduce 35.13%–45.81% of pollution emissions in 2030. The maximum reduction potential for diesel vehicles and diesel machinery under the combined scenario is 91.55% and 44.69%, respectively. In addition, the emission reduction potential of CO and NO<sub>x</sub> mainly comes from diesel vehicles, while diesel machinery has a significant reduction effect on HC and PM. Compared with the other two regions, Tianjin has a better pollution emission reduction effect with a maximum emission reduction potential of 80.80%. By type, diesel trucks contribute more to the emission reduction of pollutants, especially heavy trucks. Compared with construction machinery, the pollution emission reduction contribution of agricultural machinery is greater, especially the emission reduction contribution of combine harvesters, agricultural water pumps and tricycles. This study can provide scientific support for the development of pollution control policies for diesel mobile sources.

**Key words:** diesel vehicles; diesel machinery; air pollutants; scenario analysis; emission reduction potential; Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region

移动污染源是现阶段我国复合型大气污染的重要来源,对城市空气中细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)等二次污染的贡献突出,其中柴油车辆具有使用频率高、年限长以及行驶里程高等特点,单车排放量很高,且非道路柴油机械的污染控制措施滞后,因此这2类源组成的柴油移动燃烧源成为近几年国内各城市进一步改善空气质量的关键因素。

近年来,国内外学者对柴油车辆排放的研究逐渐增多,国外学者 McDonald 等<sup>[1]</sup>、Singh 等<sup>[2]</sup>、Jo 等<sup>[3]</sup>分别对美国、印度、韩国首尔开展了柴油车污染排放的研究,国内学者 Li 等<sup>[4]</sup>、Gu 等<sup>[5]</sup>、孙世达等<sup>[6]</sup>、汪晶发等<sup>[7]</sup>分别对北京市、河南省、青岛市、西安市的研究发现,各地区的柴油车对 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM 排放贡献很大。郭秀锐等<sup>[8]</sup>、金嘉欣等<sup>[9]</sup>、Jiang 等<sup>[10]</sup>、Song 等<sup>[11]</sup>应用 MOVES、COPERT 等模型,对国内不同地区机动车污染物在不同情景下的排放量

降低效果做出了预测研究。同时,国内外学者亦开始关注非道路移动机械的污染排放。Han 等<sup>[12]</sup>、Desouza 等<sup>[13]</sup>、范武波等<sup>[14]</sup>、姜卓等<sup>[15]</sup>分别对韩国、伦敦、四川省、乌鲁木齐市的包括农业机械和工程机械在内的非道路移动机械污染展开了研究。目前国内对工程和农业机械排放清单的深入研究仍处于起步阶段,多数采用实际测试的方法<sup>[16]</sup>获得尾气污染物数据,仅个别研究者基于发动机功率<sup>[17-18]</sup>的方法建立排放清单。对非道路移动机械的污染减排控制工作也处于初级阶段,Guo 等<sup>[19]</sup>、黄成等<sup>[20]</sup>、高成康等<sup>[21]</sup>对不同地区工程机械和农业机械的污染排放进行了预测。综合来看目前国内学者对柴油燃烧源污染的研究相对较少,且研究对象大多是柴油车或非道路柴油机械,针对两者污染减排潜力的比较有待深入研究。

京津冀地区是全国空气污染比较严重的地区,多年来生态环境部发布的74个城市空气质量

排名后10名中,有7个位于该地区。近年来《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施后该区域空气质量改善效果显著,然而京津冀地区颗粒物污染依然严重,2021年PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>年均浓度与环境空气质量二级标准相比,分别超标46.6%和24.3%。O<sub>3-8h 90th</sub>显著增长,2015—2020年增幅高达24.5%。为进一步持续改善空气质量,京津冀地区在“十四五”期间将继续采取各种大气污染控制策略,其中柴油车辆和非道路柴油机械是重点关注对象。自京津冀三地同步施行《机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》后,共同规范重型柴油货车污染排放。同时京津冀地区多措并举,加快推动淘汰国Ⅲ及以下排放标准的柴油货车。

因此,本文以京津冀区域为例,研究柴油移动燃烧源(包括柴油车辆和柴油机械)的排放现状并预测其污染排放趋势,对比评估2类源的减排潜力及不同控制措施的减排效果,以期决策者制定柴油燃烧源减排控制方案提供科学可行的决策依据。

## 1 方法

### 1.1 柴油移动燃烧源污染排放计算方法

柴油车辆污染物排放量采用《道路机动车排放清单编制技术指南》推荐的排放因子法,基于保有量和年均行驶里程数据计算求得:

$$Q_{m,n} = \sum_i \sum_j (P_{m,i,j} \times \text{VKT}_{m,i} \times \text{EF}_{i,j,n}) \times 10^{-6} \quad (1)$$

农用运输车辆的排放量使用《非道路移动源排放清单编制技术指南》推荐的排放因子法,计算公式为

$$Q_{m,n} = \sum_i \sum_j (P_{m,i,j} \times M_i \times \text{EF}_{i,j,n}) \times 10^{-6} \quad (2)$$

对于其他农业和工程机械,排放量的估算是采用基于发动机功率排放因子法进行的,公式为

$$E_{m,n} = \sum_i \sum_j (P_{m,i,j} \times G_{m,i} \times \text{LF} \times \text{hr}_i \times \text{EF}_{j,n}) \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$E_{m,n} = \sum_i \sum_j \sum_k (P_{m,k,j,i} \times G_i \times \text{LF} \times \text{hr}_i \times \text{EF}_{k,j,n}) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中: $m$ 代表不同省市; $n$ 代表污染物; $i$ 代表车型; $j$ 代表排放标准; $Q_{m,n}$ 代表 $m$ 地区柴油车排放污染物

$n$ 的排放量,t; $P_{m,i,j}$ 代表 $m$ 地区 $j$ 排放标准下 $i$ 型车型的保有量,台; $\text{VKT}_{m,i}$ 代表 $m$ 地区 $i$ 型柴油车的年均行驶里程,km; $M_i$ 代表 $i$ 型农用车的年均行驶里程,km; $\text{EF}_{i,j,n}$ 代表 $j$ 排放标准下 $i$ 型柴油车或农用车排放污染物 $n$ 的排放因子,g/km; $E_{m,n}$ 为 $m$ 地区农业或工程机械排放污染物 $n$ 的排放量,t; $G_{m,i}$ 为 $m$ 地区 $i$ 型农业或工程柴油机械的平均额定净功率,kW; $\text{LF}$ 为负荷系数(0.65); $\text{hr}_i$ 为1年内 $i$ 型农业或工程柴油机械的平均运行时间; $\text{EF}_{j,n}$ 为 $j$ 排放标准下农用柴油机械排放污染物 $n$ 的排放因子,g/(kW·h); $k$ 代表不同功率段; $\text{EF}_{k,j,n}$ 为 $k$ 功率段 $j$ 排放标准下工程柴油机械排放污染物 $n$ 的排放因子,g/(kW·h)。

#### 1.1.1 柴油移动燃烧源保有量

本研究根据《道路交通管理机动车类型》、统计年鉴以及车辆的特点和用途,将柴油车辆分为4种类型,包括轻型柴油客车、重型柴油客车、轻型柴油货车、重型柴油货车。基准年京津冀各地区汽车保有量来源于2019年中国统计年鉴,参考移动源环境管理年报中柴油车保有量占汽车保有量的比例,再按照COPERT模型要求对数据进行二次整理,最终计算得到各类型柴油车保有量。

本研究根据中国相关行业的分类标准、年鉴以及数据的可获得性,将非道路柴油机械分为农业机械和建筑工程机械,其中:农业机械又分为种植业机械、拖拉机及配套机械、农产品初加工机械、林果业机械、农田基本建设机械、运输机械,从《中国农业机械工业年鉴》中获取京津冀各地历年年末农业机械保有量,其比例根据《中国农业统计年鉴》所包括的各燃料发动机的装机功率直接识别;建筑工程机械又分为挖掘机、装载机、推土机、起重机、叉车,保有量来源于《中国工程机械工业年鉴》,通过工程机械销量、进口额和出口额数据计算得到各类工程机械保有量。市级工程机械保有量则按照各省市建筑施工面积占全国建筑施工总面积的比例进行分配。同时根据各地建筑施工面积占总施工面积的比例获得建筑施工机械保有量。参考以往研究,本研究假设起重机用电比例为60%,其余机械均为柴油机械,进而计算柴油工程机械保有量。

#### 1.1.2 柴油车年均行驶里程

机动车行驶里程直接影响机动车的污染物排放量,其受车龄影响并随年限有较大变化。本研究参考交通发展年报和其他文献调研结果获得年均行驶里程。

### 1.1.3 柴油机械发动机平均额定净功率及年运行时间

本研究通过年鉴获取各类农业机械的保有量和总功率,并将功率除以相应保有量计算得到京津冀地区农业机械的发动机平均额定净功率。非道路移动机械的年运行时间通常通过指南推荐、文献调研、问卷调查等方法获取。本研究参考《非道路移动污染源排放清单编制技术指南》的推荐值,并结合以往研究,得到不同机械的年运行时间数据。

### 1.1.4 排放因子

本研究采用 COPERT 模型估算京津冀地区柴油车污染物排放因子。COPERT 模型需要输入的参数主要包括气象参数、行驶工况参数和燃料参数,具体参数及来源见表 1。将已有的柴油车保有量、年均行驶里程、燃料品质、温度和湿度等参数代入 COPERT 模型中,计算出京津冀地区不同车型柴油车辆的排放因子。柴油机械的排放因子参考了《非道路移动污染源排放清单编制技术指南》的推荐值,同时参考了 2018 年中国环境科学研究院发布的《非道路移动机械控制管理政策体系研究报告》。

表 1 COPERT 模型重要参数

Table 1 Important parameters of the COPERT model

参数类型	模型参数	参数来源
气象参数	月最高、最低气温及月相对湿度	中国气象局
	平均旅程长度	COPERT 模型默认值, 12 km
行驶工况	平均行驶速度	机动车道路行驶速度规定
	平均累计行驶里程	道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南
燃料参数	燃料蒸气压及各成分含量	柴油标准 GB 19147—2016

## 1.2 情景设置

为研究各种控制措施下柴油燃烧源污染的减排潜力,本研究结合我国经济、交通现状和污染减排目标,基于 2019 年 1 月生态环境部、发改委、工信部、交通运输部等 11 部门联合印发的《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》中具体减排措施,筛选出我国现阶段柴油燃烧源污染排放控制措施,以此设定了两大类情景,包括基准情景和 5 种政策情景。各

类情景的详细说明见表 2。

基准情景 (business as usual, BAU) 是以 2018 年京津冀地区柴油燃烧源的发展现状为基准,不再考虑 2018 年以后相关部门出台的各种政策条例,未来年份沿用现有的排放标准和政策措施,不再增加其他的污染物控制措施。

各类政策情景中,淘汰高排放情景 (high emissions elimination, HEE) 根据《北京市进一步促进高排放老旧机动车淘汰更新方案 (2020—2021) 年》《天津市机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》《河北省机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》等政策中关于淘汰高排车的相关规定,设定至 2020 年底实现国 III 及以下标准柴油车全部淘汰,依据机动车强制报废的规定逐年淘汰,到 2025 年全部淘汰国 I 及以下标准非道路柴油机械。

提升排放标准情景 (emission standards upgrade, ESU) 根据《关于北京市实施第六阶段机动车排放标准的通告 (征求意见稿)》以及天津市生态环境局和河北省生态环境厅发布的关于机动车实施第六阶段排放标准的通告,设定自 2020 年起北京柴油车实施国 VIb 排放标准,天津和河北的轻型柴油车 2019 年起提前实施国 VIb 排放标准,重型柴油车 2021 年起实施国 VIa 排放标准,2023 年起实施国 VIb 排放标准。北京市自 2021 年起,天津市和河北省自 2022 年起实施非道路柴油机械国家第四阶段标准。

推广新能源情景 (new energy promotion, NEP) 依据《新能源汽车产业发展规划 (2021—2035 年)》中关于新能源汽车销量的规定,预计 2025 年新能源汽车销量占当年汽车总销量的 25%,到 2030 年占比达 40%。假设以 2018 年新能源车销量占比为基准,新能源汽车销量占比以每年 3% 匀速增长,新能源机械保有量占比以每年 1% 的增速匀速增长。

运输公转铁情景 (highway to railway, HTR) 根据《推进运输结构调整三年行动计划 (2018—2020 年)》的相关规定假设全国铁路货运总量每年增长 10%,并计算得到相对应减少的公路货运量。同时根据相关公转铁的研究可知,进行大宗货物运输的是重型货车,因此本文只调整重型柴油货车的运量。

综合情景 (comprehensive scenario, CS) 是 4 种政策情景的所有控制措施叠加,理论上是最强的情景。

表2 本研究的情景设置  
Table 2 Scenarios designed in this study

情景	柴油车	柴油机械
基准情景	以2018年为基准年,保持现行政策不变,未来继续采用现有的排放标准和污染防治政策条例,不增加其他控制措施。	
淘汰高排放情景	设定到2020年底,全面淘汰国Ⅲ标准以下柴油车。此后,柴油车将按照机动车强制报废的规定,逐年淘汰	设定到2025年底,全面淘汰国Ⅰ及以下排放标准的柴油机械。此后按照机械强制报废年限对机械进行淘汰
提升排放标准情景	北京柴油车于2020年起采用国Ⅵb排放标准,天津和河北的轻型柴油车2019年起采用国Ⅵb排放标准,重型车自2021年起采用国Ⅵa排放标准,2023年起采用国Ⅵb排放标准	2021年起北京柴油机械采用国Ⅳ排放标准,天津和河北的柴油机械2022年起采用国Ⅳ排放标准
推广新能源情景	2019年起,新能源汽车在中国的销售比例每年提高3%	2019年起,新能源机械保有量占中国非道路移动机械的比例每年提高1%
运输公转铁情景	2019年起,铁路货运总额每年增长10%	
综合情景	综合考虑以上各种政策措施对柴油燃烧源污染排放的影响,将以上4种政策情景的所有控制措施叠加,并分析其减排潜力	

### 1.3 排放量预测及潜力估算方法

#### 1.3.1 排放量预测方法

本研究采用弹性系数法,预测柴油车辆保有量和年均行驶里程以及柴油机械保有量数据。依据以往研究<sup>[22-23]</sup>,结合GDP的历史数据,基于京津冀地区2002—2018年各车型柴油车保有量和2008—2018年各机型柴油机械保有量的变化情况,建立保有量增长率与GDP增长率的关系,估算得到各类型柴油燃烧源对应的弹性系数。参考京津冀地区的经济发展规划,利用GDP未来增长率,确定京津冀地区柴油燃烧源保有量未来增长趋势,进而预测得到2019—2030年柴油燃烧源的保有量,同理预测柴油车辆未来行驶里程。根据不同情景的设定,对应调整各政策情景下柴油燃烧源保有量,具体新增保有量如表3所示。

#### 1.3.2 减排潜力估算方法

污染物减排潜力能够定量地反映污染减排效果,通常有2种计算方式。一种是未来年份各情景下污染物排放量与基准年污染排放的差值,另一种是未来各政策情景下污染物排放量与基准情景下污染排放差值。本研究采用第2种方式来客观评价不同情景下柴油燃烧源污染物的减排效果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 目标年排放量预测

#### 2.1.1 基准情景

基于COPERT模型和基础活动水平数据,本研究估算了2018年京津冀地区柴油燃烧源污染物排放量,CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM的排放量分别为51.25、22.89、106.52和5.42万t,其中HC、NO<sub>x</sub>和PM排放量分别占全国相应排放量的17.74%、14.99%和7.47%。表4显示的是2018年京津冀地区的柴油移动燃烧源污染物排放分布,可以看出CO、HC和NO<sub>x</sub>的排放量远大于PM,河北省对京津冀地区的污染排放贡献最大,其次是北京市和天津市,河北省的占比达到73.18%~88.85%。

京津冀地区2019—2030年柴油车辆和柴油机械污染物排放预测结果如图1所示。按目前京津冀地区柴油源保有量增长趋势,如不再增加其他的污染物控制措施,至2030年排放的CO和NO<sub>x</sub>均将大幅增加,预计到2030年,CO排放量为87.57万t,较基准年增长71%,NO<sub>x</sub>排放量较2018年增长62%,柴油车贡献持续增加。HC与PM排放量与基准年相比变化较小,排放量趋于平稳,柴油机械对

表3 京津冀地区柴油燃烧源新增保有量

Table 3 New retention of diesel combustion source in the BTH region

情景	柴油车	柴油机械
HEE	2018—2020年逐步淘汰国Ⅰ、国Ⅱ和国Ⅲ的柴油车辆,至2020年底全部淘汰。同时按照轻型客车使用10年,其他类型柴油车使用15年后强制淘汰	调整每年不同标准柴油机械保有量比例,使得2025年底国Ⅰ及以下柴油机械全面淘汰。同时机械达到规定的使用年限自然淘汰
ESU	自新标准实施年份开始,假设新增柴油车均为最新标准车辆,其他标准柴油车保有量保持不变	自国Ⅳ实施年份开始,增加国Ⅳ柴油机械,调整国Ⅲ柴油机械保有量比例,其他标准柴油机械保有量保持不变
NEP	每年基准情景下国Ⅴ柴油车保有量减去对应新能源车的保有量得到,其中新增新能源车保有量每年提高3%,其他标准柴油车保有量保持不变	每年基准情景下国Ⅲ柴油机械保有量减去对应新能源机械的保有量得到,其中新能源机械的保有量比例每年增加1%,其他标准柴油机械保有量保持不变
HTR	每年基准情景下柴油车保有量减去对应年份运输公转铁所对应的柴油车保有量得到。预计2030年能对应减少109.70万辆重型货车	
CS	将上述柴油燃烧源保有量结合得到	

表4 2018年京津冀地区的柴油移动燃烧源的污染物排放分布

Table 4 Pollutant emission distribution of diesel mobile combustion sources in the BTH region in 2018

污染物	排放量/万 t		
	北京	天津	河北
CO	8.94	3.91	38.40
HC	1.73	1.15	20.01
NO <sub>x</sub>	17.25	8.64	80.63
PM	0.79	0.35	4.28

HC和PM贡献较大,PM总体排放趋势为先下降后上升,这表明现有污染治理政策手段对控制PM的排放有一定的效果。在目前京津冀地区环境空气质量的形势下,如按上述增长态势,柴油移动燃烧源引发的复合型大气环境污染将愈发严重,不利于京津冀空气质量改善的目标。

### 2.1.2 政策情景

2018—2030年京津冀地区柴油车辆在不同情景下的污染物排放趋势如图2所示。

CS情景下2030年的CO、NO<sub>x</sub>、PM和VOC排放量与2018年相比分别可以减少50.91%、65.20%、75.39%和77.00%,实现排放量的显著降低。在其他政策情景下,2030年柴油车的污染物排放会比2018年减少,但HEE情景除外。在HEE情景下,柴油车的CO、NO<sub>x</sub>和VOC排放到

2030年分别增加143.10%、117.18%和38.73%,趋势表现为先下降后上升,即该情景长期污染控制效果较弱。ESU情景下污染物排放的下降效应最为显著,到2030年,所有情景下的PM排放量都可以大幅减少。

2019—2030年京津冀地区柴油机械在不同情景下的污染物排放趋势如图3所示,可以看出CS情景下2030年HC、NO<sub>x</sub>和PM的排放量分别可以减少4.33%、20.72%和32.47%,其中HC和NO<sub>x</sub>的排放量表现为先下降后上升,PM的排放量下降后趋向稳定。ESU情景和NEP情景下减排效果较差,CO、HC和NO<sub>x</sub>均表现为上升趋势,即这2种方案对于柴油机械的污染控制效果较差。HEE情景下各污染物排放量均表现为先下降后上升,此情景对于柴油机械的短期效果显著,长期效果大幅减弱。与目前情况相比,到2030年所有情景下CO的排放量都表现为增加趋势,而PM的下降趋势较为明显,表明现有的污染治理政策对CO效果较差,对PM表现较好。

## 2.2 减排潜力分析

### 2.2.1 不同情景的减排潜力

京津冀地区不同政策实施后污染物的减排效果存在差异。本研究中的减排潜力即政策情景与基准情景下的污染物排放之差,可以反映柴油车辆和柴油机械实施具体控制措施后的减排效果。图4显示的是京津冀地区在不同政策情景下柴油燃烧源的污染物减排潜力。

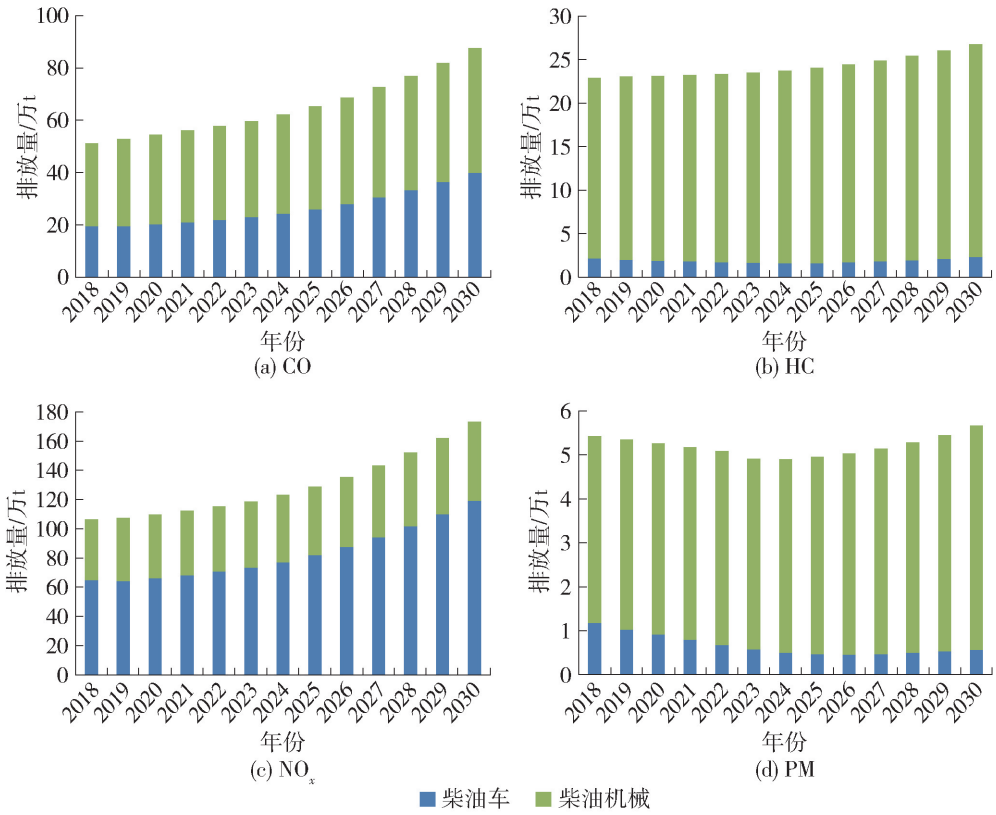


图 1 京津冀地区基准情景下柴油车辆和柴油机械的污染物排放量预测

Fig. 1 Prediction of pollutant emissions from diesel vehicles and diesel machinery under the BAU scenario in the BTH region

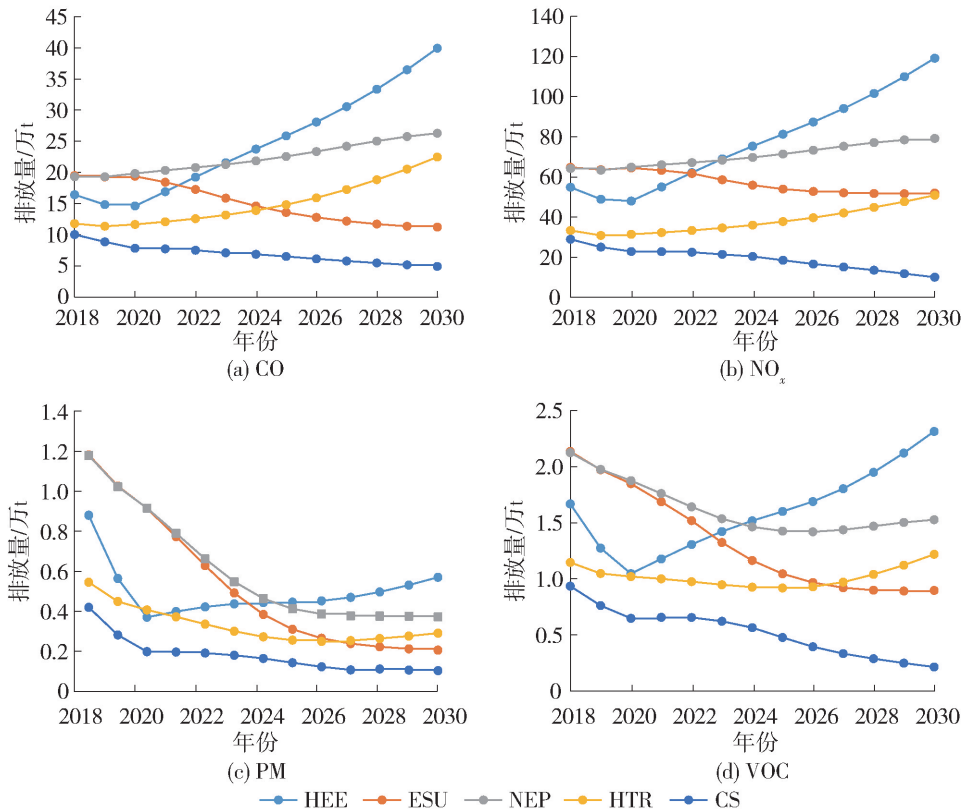


图 2 京津冀地区柴油车辆不同情景下的污染物排放预测

Fig. 2 Prediction of pollutant emissions from diesel vehicles under various scenarios in the BTH region

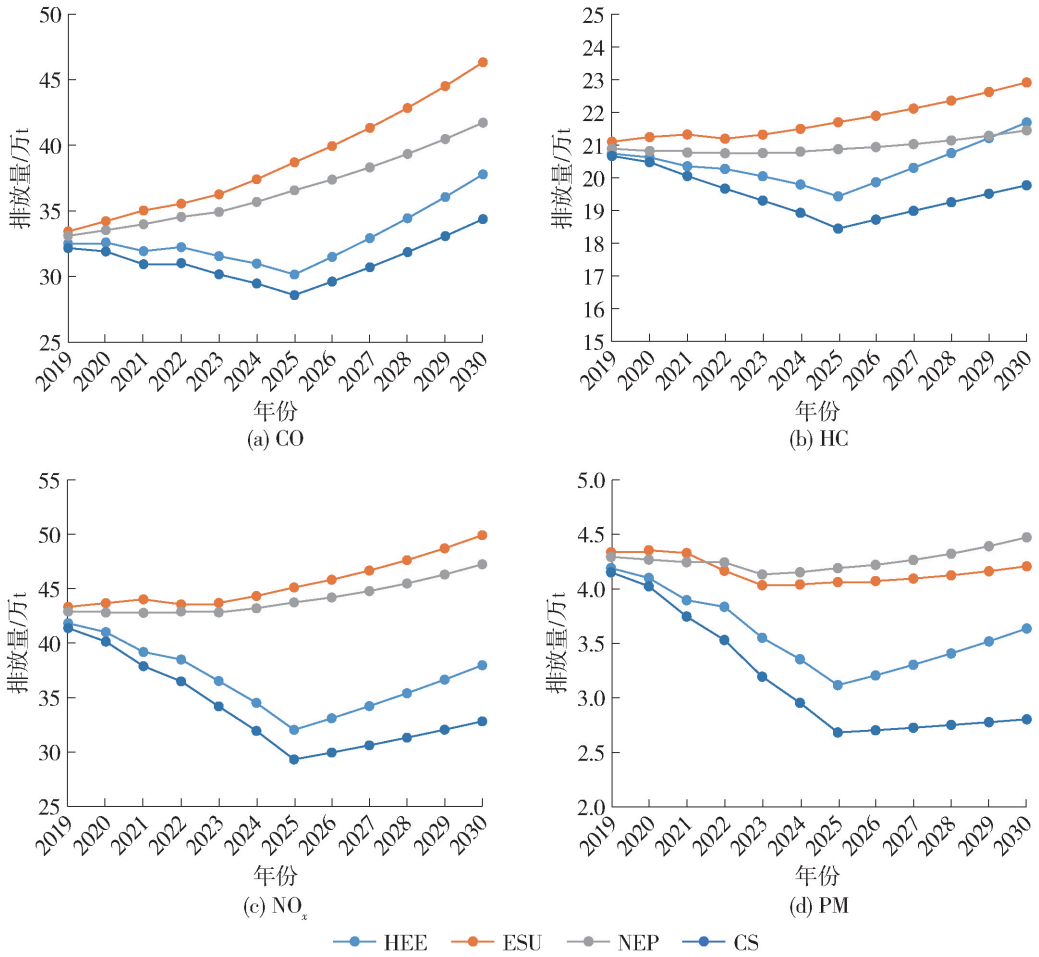


图3 京津冀地区柴油机械不同情景下的污染物排放预测

Fig. 3 Prediction of pollutant emissions from diesel machinery under various scenarios in the BTH region

对于柴油车辆来说,京津冀地区CS情景下减排潜力可以达到91.55%。ESU情景和NEP情景下污染减排潜力稳步上升,2030年污染物的最大减排潜力预计分别能达到71.88%和34.91%。HEE情景的短期减排效果较好,2020年后污染物的减排潜力逐渐下降,至2026年趋近消失。HTR情景下CO和NO<sub>x</sub>的减排潜力稍有增加,PM和VOC的减排潜力呈现先下降后轻微上升的趋势,表明运输公转铁政策的实施对于PM和VOC的减排效果不理想。

对于柴油机械来说,京津冀地区的NO<sub>x</sub>和PM减排潜力较为突出,综合情景下可分别达到38.79%和44.69%。HEE情景下减排潜力表现为先上升,至2025年后开始下降的趋势,表明淘汰高排放车辆政策的实施只有在短时间内减排效果较好。ESU情景下在2021年后各污染物的减排潜力逐渐上升,但整体减排效果较差。由于考虑了新能源汽车电力生产过程中的间接污染排

放,相对于其他情景,NEP情景下污染物的整体减排潜力较小。

对于不同地区,北京市和天津市的最大减排潜力分别为84.62%和94.51%,其中北京市对柴油机械排放的PM减排最为显著,2030年CS情景下PM的减排潜力可达到55.82%。天津市对NO<sub>x</sub>的减排最为显著,柴油车辆和机械2030年可分别减少94.51%和38.67%的NO<sub>x</sub>排放。河北省柴油燃烧源在此情景下的污染物减排潜力最大,2030年PM的减排潜力能达到54.84%,且减排量全部来自重型柴油货车。

## 2.2.2 不同类型车辆的减排潜力

对于柴油车辆来说,HEE情景下4种污染物的减排潜力来源比较接近。预测初期,重型货车的减排贡献最大,之后重型客车减排贡献不断增加,从2025年开始轻型客车污染物减排潜力逐渐凸显,2030年污染物减排分担率高达97%以上,成为第一减排贡献源。ESU情景下预测年份初期污染物的减



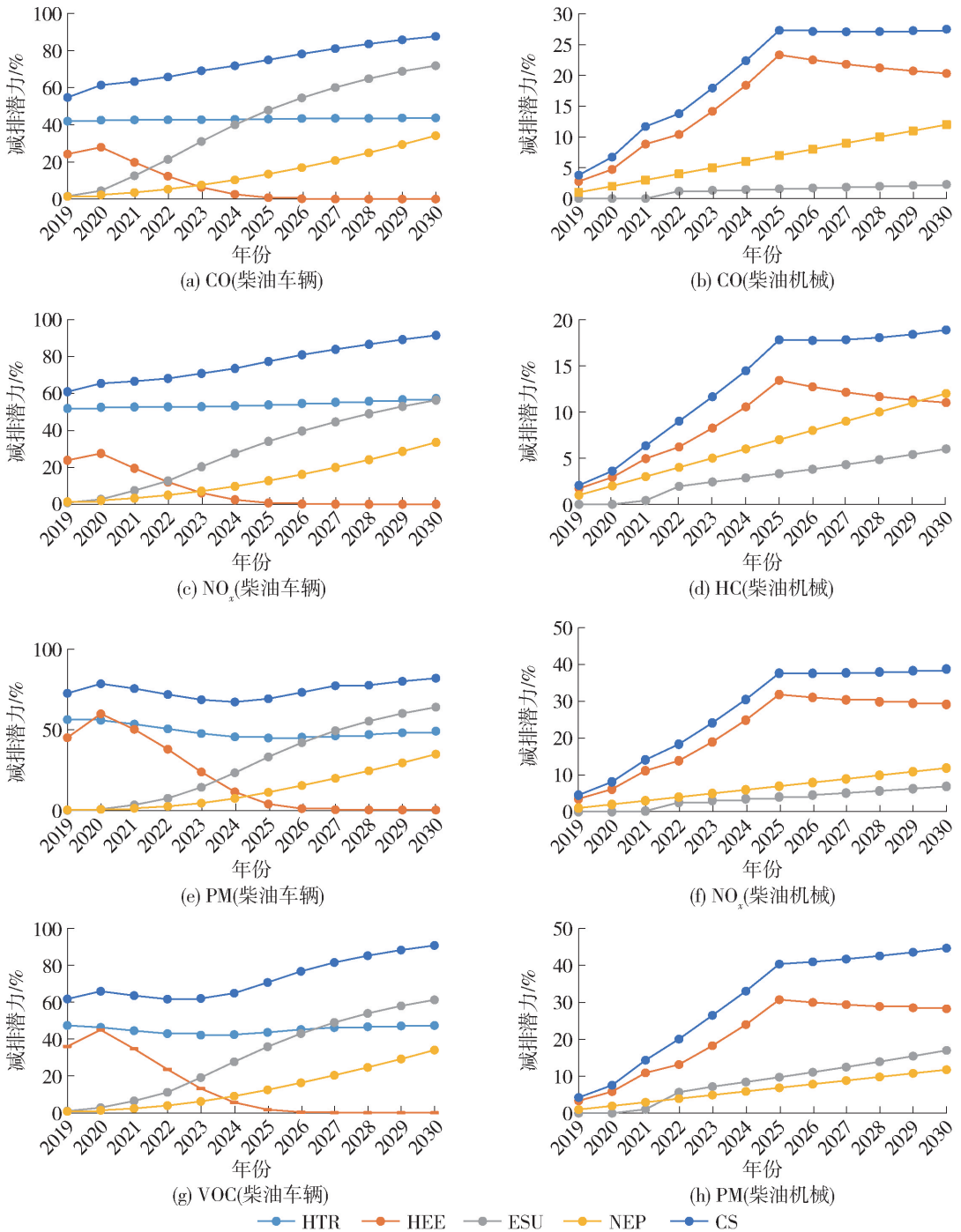


图4 京津冀地区柴油燃烧源不同情景污染物减排潜力

Fig. 4 Pollutant reduction potential for different scenarios of diesel combustion sources in the BTH region

排潜力主要来自轻型货车,少量来自轻型客车。随着重型柴油车加严标准的实施,重型货车在预测后期成为第一大污染物减排贡献源,2030年对CO、NO<sub>x</sub>和PM的减排分担率均在60%以上。NEP情景下各车型柴油车的减排分担率相对均衡,CO和HC减排量主要来源于柴油货车,重型货车对NO<sub>x</sub>的减排贡献最大,减排分担率可以达到65%以上,PM的

减排量主要来源于重型柴油车。

图5展示了CS情景下京津冀地区柴油车污染物减排分担率,可以看出污染物减排量大部分来源于重型货车,未来年污染物减排潜力为61.99%~86.79%。对于PM,重型客车的减排贡献稳定在12.77%~21.94%。对于其他3种污染物,重型客车的减排贡献逐渐减小,轻型货车的减排分担率逐

渐增大,表明预测初期重型客车的减排效果较好,轻

型货车的长期减排效果好。

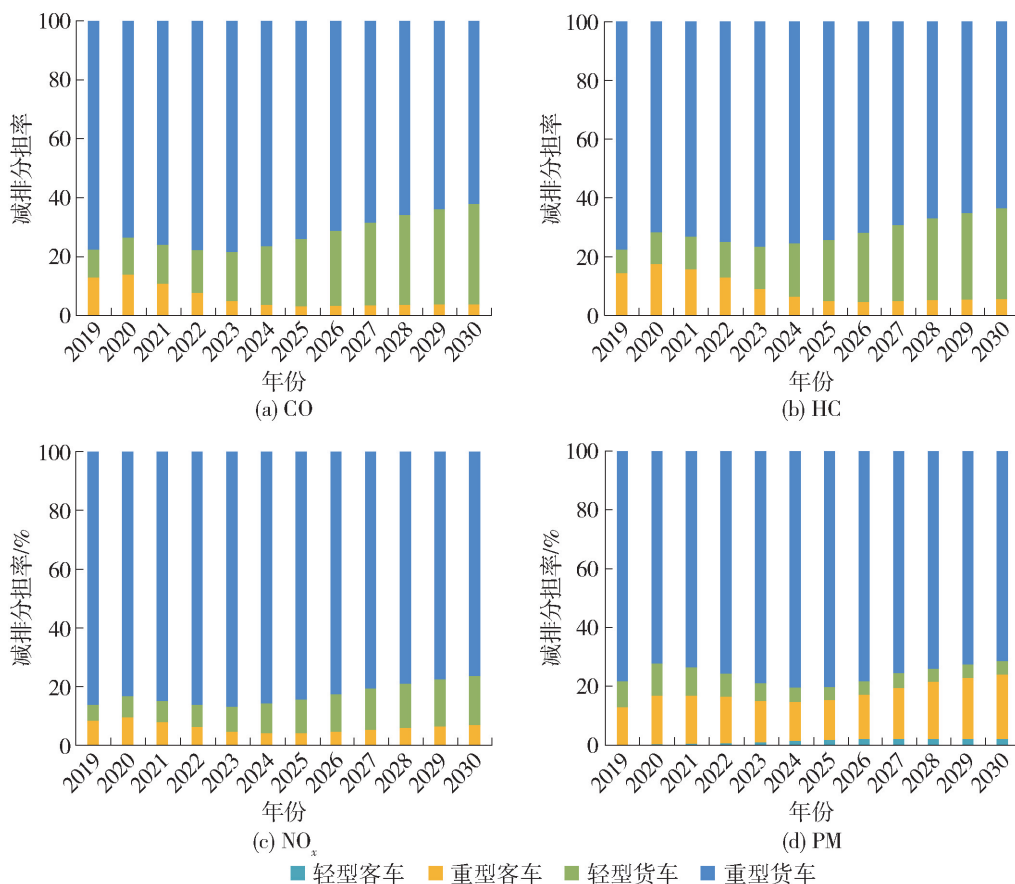


图5 CS情景下京津冀地区柴油车辆的污染物减排分担率

Fig. 5 Pollutant emission reduction of diesel vehicles under the CS scenario in the BTH region

对于柴油机械来说,HEE 情景下农业柴油机械的减排量明显大于工程柴油机械,联合收割机是污染物减排量的最大贡献源,预计2030年CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM的减排分担率分别为36.62%、26.4%、32.45%和32.71%。ESU情景下CO减排量全部来自农业机械,这是因为CO国III和国IV的排放因子相同,而工程机械的各项参数预测年内保持恒定,故工程机械对CO没有减排贡献,各机型机械对污染物的减排分担率接近。NEP情景下HC的减排量绝大部分来自农用运输车,各类机械对其余3种污染物的减排贡献比例相似,长期来看联合收割机的减排分担率逐渐增大,2030年对CO和NO<sub>x</sub>的减排贡献分别将达20.86%和22.85%,成为主要减排贡献源。PM减排量主要来源于三轮车和联合收割机,预计2030年减排分担率分别为18.27%和18.98%。

图6展示了CS情景下京津冀地区柴油机械污染物减排分担率。由图可知预测初期HC的减排量主要来自农用三轮车,减排潜力为35.15%。随着

联合收割机减排贡献的增大,预计2030年减排分担率为26.56%,成为HC第一大减排贡献源。对于其他污染物,各机械的减排分担率也比较平均,农用水泵、挖掘机、小型拖拉机对污染物的减排贡献基本保持在10%左右。预测年后联合收割机的减排贡献不断增大,成为第一减排贡献源,预计2030年对CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM的减排贡献率分别为29.14%、26.56%、32.10%和30.02%。

### 2.3 不确定性分析

本研究总结了其他文献中柴油车辆和非道路柴油机械排放情况,表5展示了本研究基准年的柴油车与柴油机械排放量和其他研究的对比分析。对于柴油车辆来说,从城市层面看,本研究北京市和天津市柴油车排放量与王计广等<sup>[24]</sup>计算的唐山市柴油车排放量较为接近。但从各层面看京津冀柴油车排放量(NO<sub>x</sub>除外)略低于Gong等<sup>[25]</sup>、黄奕玮等<sup>[26]</sup>、Gu等<sup>[5]</sup>、王荆玲<sup>[27]</sup>的研究结果。产生排放量差异的主要原因有以下几点:其他研究年份较早,当时高排车辆保有量大,排放因子较

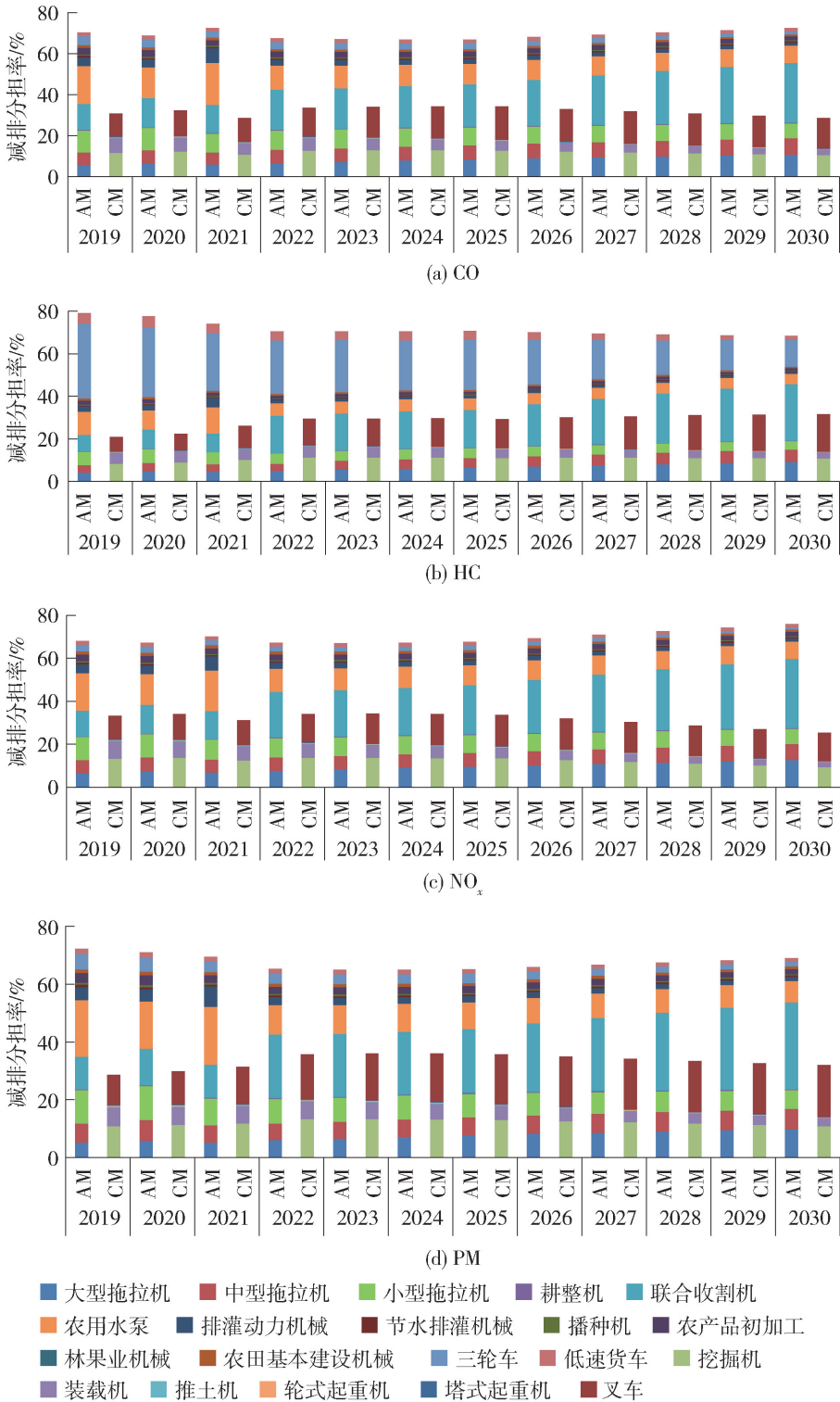


图6 CS情景下京津冀地区柴油机械的污染物减排分担率

Fig.6 Pollutant emission reduction of diesel machinery under the CS scenario in the BTH region

高,使得整体排放水平较高。且大部分研究是对机动车整体进行研究,可能对柴油车排放分担率估算较大。此外研究地区和年份各不相同,也会造成排放结果存在差异。

对于柴油机械来说,本研究北京市农业机械污染物排放量与王凯等<sup>[16]</sup>、Hou等<sup>[29]</sup>学者的研究结果比较接近,天津市的污染排放与解淑霞等<sup>[17]</sup>对成都市的相关研究结果相似。总体来看,本研究结果

表5 柴油燃烧源污染物排放量结果与其他研究对比

Table 5 Comparison of diesel combustion source pollutant emission results with other studies

柴油燃烧源类型	研究类型	研究区域	研究年份	排放量/万 t				参考文献
				CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	
柴油燃烧	城市	郑州	2013	5.6	0.8	9.1	0.6	Gong 等 <sup>[25]</sup>
		唐山	2020	2.7	0.3	6.5	0.2	王计广等 <sup>[24]</sup>
		北京	2019	2.9	0.3	9.0	0.2	本研究
		天津	2019	2.0	0.2	6.1	0.1	本研究
	省份	江苏	2012	29.6	7.1	57.2	2.9	黄奕玮等 <sup>[26]</sup>
		河南	2015	23.4	4.0	45.5	1.9	Gu 等 <sup>[5]</sup>
		河北	2019	14.6	1.6	49.6	0.9	本研究
	地区	长三角	2015	68.6	13.9	90.6	4.1	王荆玲 <sup>[27]</sup>
		京津冀	2015	24.6	3.5	49.8	2.5	刘芳熙 <sup>[28]</sup>
		京津冀	2019	19.5	2.1	64.8	1.2	本研究
柴油车辆	农业机械	北京	2017	0.26	0.06	0.12	0.05	王凯等 <sup>[16]</sup>
		北京	2016	0.09	0.02	0.11	0.01	Hou 等 <sup>[29]</sup>
		北京	2019	0.23	0.10	0.30	0.03	本研究
		天津	2019	0.80	0.69	1.03	0.12	本研究
	地区	天津	2018	0.42	0.10	0.58	0.08	Zhang 等 <sup>[30]</sup>
		成都	2018	1.12	0.29	1.67	0.08	解淑霞等 <sup>[17]</sup>
		广东	2014	4.51	1.16	6.11	0.93	卞雅慧等 <sup>[31]</sup>
	工程机械	北京	2019	5.81	1.28	7.94	0.59	本研究
		天津	2019	1.08	0.24	1.48	0.11	本研究
		河北	2019	2.88	0.64	3.94	0.29	本研究

略高于 Zhang 等<sup>[30]</sup>、卞雅慧等<sup>[31]</sup>的研究,这可能因为本文的研究年份较新,机械保有量较过去增大,并且研究区域以及研究的机械类型不同。

本研究假设活动水平和排放因子数据都服从对数正态分布,采用 Monte Carlo 模拟方法对基准情景下 2030 年京津冀地区柴油燃烧源污染物进行不确定性分析,不确定性较低,不确定度为 5%。从其他研究中总结的其他活动水平数据的不确定度为 20%~50%。根据以往研究中关于活动水平数据不确定度的设定<sup>[32-34]</sup>,假设本研究柴油车年均行驶里程数据不确定度为 30%。同时假设柴油机械平均额定功率和年运行时间不确定度为 20%。排放因子的不确定度较高,不同污染物的排放因子的不确定度有所不同。根据以往的研究<sup>[35-38]</sup>,可以确定柴油车 CO、VOC 和 NO<sub>x</sub> 排放因子的不确定度均为 17%,而 PM 排放因子的不确定度为 34%。柴油机

械污染物排放因子的不确定度为 50%。

试验次数也会影响 Monte Carlo 的估算结果,因此为保证估算结果的准确性,设置试验次数为 100 000 次,最终获得不确定性定量分析结果。结果表明,在 95% 置信水平下污染物 CO、HC、NO<sub>x</sub> 和 PM 的不确定性范围分别为 -8%~11%、-31%~31%、-5%~5%、-45%~39%,说明排放量计算的不确定性较低,研究结果可信度较高,本文对不同情景下的污染物减排潜力的研究为京津冀地区柴油移动源的控制策略提供了可靠的科学依据。

### 3 结论

本文应用 COPERT 模型,通过排放因子法计算京津冀地区 2018 年柴油移动燃烧源的污染排放,在此基础上设立基准情景和 5 种政策情景,对 2019—2030 年各情景下的污染物减排效果进行研究,得出

以下结论:

1) 2018年京津冀地区柴油移动燃烧源CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM排放量分别为51.25、22.89、106.52和5.42万t。柴油车辆对NO<sub>x</sub>排放贡献率大,为60.82%;而柴油机械对CO、HC和PM排放贡献率大,分别为61.93%、90.67%和78.19%。

2) 基准情景下京津冀地区柴油燃烧源污染物排放量将呈增长趋势,预计该地区2030年CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM将比2018年分别增长71.07%、16.83%、62.52%和4.81%。增长的HC和PM大部分来源于柴油机械排放,而CO和NO<sub>x</sub>排放则来自柴油车辆和柴油机械2类源。

3) 比较政策情景的减排效果发现,综合情景下京津冀地区内三地的柴油燃烧源污染物排放均可大幅减少,污染物减排潜力不断增大但增长速度逐渐减缓,2030年CO、HC、NO<sub>x</sub>和PM排放量可分别较2018年减少23.31%、12.72%、59.33%和45.12%。北京市和天津市的最大减排潜力分别为84.62%和94.51%,其中:北京市对柴油机械排放的PM减排最为显著,2030年综合情景下PM的减排潜力可达到55.82%;天津市对NO<sub>x</sub>的减排最为显著,柴油车辆和机械2030年可分别减少94.51%和38.67%的NO<sub>x</sub>排放。淘汰高排放情景短期内效果显著,而长期效果减弱;提升排放标准情景和推广新能源情景的减排潜力随着时间推移会不断增加,对几种污染物均有较好的减排作用;运输公转铁情景的减排潜力比较稳定,河北省柴油燃烧源在此情景下的污染物减排潜力最大,2030年PM的减排潜力能达到54.84%,且减排量全部来自重型柴油货车。

## 参考文献:

- [1] MCDONALD B C, MCKEEN S A, CUI Y Y, et al. Modeling ozone in the eastern U. S. using a fuel-based mobile source emissions inventory [J]. Environ Sci Technol, 2018, 52(13): 7360-7370.
- [2] SINGH N, MISHRA T, BANERJEE R. Emission inventory for road transport in India in 2020: framework and post facto policy impact assessment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(14): 20844-20863.
- [3] JO H, KIM H. Developing a traffic model to estimate vehicle emissions: an application in Seoul, Korea [J]. Sustainability, 2021, 13(17): 1-18.
- [4] LI Y X, LV C, YANG N, et al. A study of high temporal-

spatial resolution greenhouse gas emissions inventory for on-road vehicles based on traffic speed-flow model: a case of Beijing [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 122419.

- [5] GU X K, YIN S S, LU X, et al. Recent development of a refined multiple air pollutant emission inventory of vehicles in the Central Plains of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 84: 80-96.
- [6] 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.
- [7] SUN S D, JIN J X, LÜ J H, et al. Developing vehicle emission inventory based on refined annual average vehicle kilometers travelled [J]. China Environmental Science, 2020, 40(5): 2018-2029. (in Chinese)
- [8] 汪晶发, 宋慧, 巴利萌, 等. 西安市机动车污染物排放清单与空间分布特征 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(6): 666-671, 677.
- [9] WANG J F, SONG H, BA L M, et al. Study on the vehicle emission inventory and spatial distribution characteristics in Xi'an [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(6): 666-671, 677. (in Chinese)
- [10] 郭秀锐, 刘芳熙, 符立伟, 等. 基于LEAP模型的京津冀地区道路交通节能减排情景预测 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(11): 1743-1749.
- [11] GUO X R, LIU F X, FU L W, et al. Scenarios prediction of energy saving and emission reduction in the road transport sector of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(11): 1743-1749. (in Chinese)
- [12] 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 等. 辽宁省2000—2020年机动车排放清单及情景分析 [J]. 环境科学, 2020, 41(2): 665-673.
- [13] JIN J X, SUN S D, WANG P, et al. Vehicle emission inventory and scenario analysis in Liaoning from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 665-673. (in Chinese)
- [14] JIANG P Y, ZHONG X, LI L Y. On-road vehicle emission inventory and its spatio-temporal variations in North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115639.
- [15] SONG H, DENG S X, LU Z Z, et al. Scenario analysis of vehicular emission abatement procedures in Xi'an, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116187.
- [16] HAN G G, JEON J H, CHO Y J, et al. Analysis of air pollutant emissions for mechanized rice cultivation in

- Korea [J]. *Agriculture*, 2021, 11(12): 1-11.
- [13] DESOUZA C D, MARSH D J, BEEVERS S D, et al. Real-world emissions from non-road mobile machinery in London [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 223: 117301.
- [14] 范武波, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4460-4468.
- FAN W B, CHEN J H, LI Y, et al. Study on the non-road mobile source emission inventory for Sichuan province [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 4460-4468. (in Chinese)
- [15] 姜卓, 王宝庆, 牛宏宏, 等. 乌鲁木齐市非道路移动源排放清单研究 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(增刊1): 182-186.
- JIANG Z, WANG B Q, NIU H H, et al. Study on non-road mobile sources emission inventory in Urumqi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42 (suppl 1): 182-186. (in Chinese)
- [16] 王凯, 樊守彬, 亓浩雲. 北京市农业机械排放因子与排放清单 [J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2602-2608.
- WANG K, FAN S B, QI H Y. Emission factors and emission inventory of agricultural machinery in Beijing under real-world operation [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2602-2608. (in Chinese)
- [17] 解淑霞, 唐祎骥, 陈秋宇, 等. 成都市非道路施工机械排放清单研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(9): 2889-2895.
- XIE S X, TANG Y S, CHEN Q Y, et al. Emission inventory of non-road construction machinery in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(9): 2889-2895. (in Chinese)
- [18] 刘永腾, 彭永伦, 张崇波, 等. 北京市2019年工程机械排放污染测算 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(6): 2835-2844.
- LIU Y T, PENG Y L, ZHANG C B, et al. Study of the Beijing construction machinery emission pollution in 2019 [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(6): 2835-2844. (in Chinese)
- [19] GUO X R, WU H K, CHEN D S, et al. Estimation and prediction of pollutant emissions from agricultural and construction diesel machinery in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 113973.
- [20] 黄成, 安静宇, 鲁君. 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 [J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 3965-3975.
- HUANG C, AN J Y, LU J. Emission inventory and prediction of non-road machineries in the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 3965-3975. (in Chinese)
- [21] 高成康, 由焕, 巴乔, 等. 东北地区非道路移动源排放清单研究及情景预测 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 358-366.
- GAO C K, YOU H, BA Q, et al. Study on a non-road mobile source emission inventory and scenario prediction in Northeast China [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(3): 358-366. (in Chinese)
- [22] LIU Y H, LIAO W Y, LIN X F, et al. Assessment of Co-benefits of vehicle emission reduction measures for 2015 - 2020 in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223: 62-72.
- [23] 林晓芳, 徐伟嘉, 刘永红, 等. 广东省车辆存活概率曲线及规律 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2019, 58(1): 65-73.
- LIN X F, XU W J, LIU Y H, et al. Survival probability pattern and its influencing factors of vehicles in Guangdong province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2019, 58(1): 65-73. (in Chinese)
- [24] 王计广, 桂华侨, 陈金潮, 等. 唐山市机动车排放清单与减排经济效益研究 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5114-5124.
- WANG J G, GUI H Q, CHEN J C, et al. Vehicle emission inventory and economic benefits of emission reduction in Tangshan [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5114-5124. (in Chinese)
- [25] GONG M M, YIN S S, GU X K, et al. Refined 2013-based vehicle emission inventory and its spatial and temporal characteristics in Zhengzhou, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 1149-1159.
- [26] 黄奕玮, 赵瑜, 杨杨, 等. 基于不同方法的省级机动车大气污染物排放清单研究: 以江苏省为例 [J]. *中国科技论文*, 2017, 12(3): 346-353.
- HUANG Y W, ZHAO Y, YANG Y, et al. Study on the emission inventory of provincial vehicles based on different methods: a case of Jiangsu province [J]. *China Sciencepaper*, 2017, 12(3): 346-353. (in Chinese)
- [27] 王荆玲. 长三角机动车污染排放特征及控制政策评价研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG J L. Study and evaluation on pollution characteristics and control policies of motor vehicles in the

- Yangtze River Delta region [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [28] 刘芳熙. 京津冀地区柴油车排放与控制情景预测研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2018.  
LIU F X. Prediction of diesel vehicle emission and control scenarios in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [29] HOU X N, TIAN J L, SONG C B, et al. Emission inventory research of typical agricultural machinery in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2019, 216: 116903.
- [30] ZHANG Q J, WEI N, YANG L, et al. Emission inventory and control policy for non-road construction machinery in Tianjin [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(5): 6688-6697.
- [31] 卞雅慧, 范小莉, 李成, 等. 广东省非道路移动机械排放清单及不确定性研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2167-2178.  
BIAN Y H, FAN X L, LI C, et al. A sector-based emission inventory and its uncertainty from non-road mobile machinery in Guangdong province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(6): 2167-2178. (in Chinese)
- [32] SUN S D, SUN L N, LIU G, et al. Developing a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution in Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145873.
- [33] LANG J L, ZHOU Y, CHENG S Y, et al. Unregulated pollutant emissions from on-road vehicles in China, 1999 - 2014 [J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 974-984.
- [34] KARVOSENOJA N, TAINIO M, KUPIAINEN K, et al. Evaluation of the emissions and uncertainties of PM<sub>2.5</sub> originated from vehicular traffic and domestic wood combustion in Finland [J]. Boreal Environment Research, 2008, 13(5): 465-474.
- [35] GUO X, FU L, JI M, et al. Scenario analysis to vehicular emission reduction in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 470-479.
- [36] SONG X, HAO Y. Vehicular emission inventory and reduction scenario analysis in the Yangtze River Delta, China [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(23): E4790.
- [37] WANG F, LI Z, ZHANG K S, et al. An overview of non-road equipment emissions in China [J]. Atmospheric Environment, 2016, 132: 283-289.
- [38] ZAVALA M, HUERTAS J I, PRATO D, et al. Real-world emissions of in-use off-road vehicles in Mexico [J]. J Air Waste Manag Assoc, 2017, 67(9): 958-972.

(责任编辑 张 蕾)