

基于情景分析的北京市机动车污染排放控制研究

郭秀锐*, 吉木色, 郎建垒, 陈东升, 程水源 (北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 为了研究未来北京市机动车排放控制措施的减排效果, 本文基于情景分析法, 以 2010 年为基准年, 通过设置 3 类控制措施情景, 估算 2011~2020 年不同情景下北京市机动车常规污染物排放量, 并在基准情景基础上, 估算污染物减排量, 分析控制措施对不同类型机动车的减排贡献。结果表明, 尽管未来北京市机动车保有量会有较大增长, 实施机动车排放控制措施仍可取得显著的减排效果。单一措施中, 淘汰高排放车减排量最大。其中, 淘汰轻型客车可有效减少 CO 的排放, 减排贡献率为 89.4%; 淘汰重型客车可对 NO_x、HC 和 PM₁₀ 达到有效削减, 其贡献率分别为 65.5%、55.8%、93.4%。实施新的排放标准对重型柴油车的排放也有明显控制效果, 且 4 种污染物都能得到有效削减。综合实施各种措施的效果最为显著, 2020 年对 CO、NO_x、HC、PM₁₀ 的削减效果分别达到 46.4%、42.1%、8.6% 和 50.6%。

关键词: 机动车污染; 情景分析; 减排量; 北京

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)09-1690-07

Based on the scenario analysis of Beijing motor vehicle emission control research. GUO Xiu-rui*, JI Mu-se, LANG Jian-lei, CHEN Dong-sheng, CHENG Shui-yuan (College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2013,33(9): 1690~1696

Abstract: Effect of vehicular emission control measures in future years (2011~2020) was assessed based on the scenario analysis in Beijing. The conventional pollutants emissions of motor vehicle in three kinds of control measures scenarios in future years have been estimated, which compared with the Business-as-usual (BAU) scenario to calculate the emission reduction. The results indicated that although the Beijing motor vehicle population would have a certain growth, emission control measures would get significant effect. The elimination of high-emission vehicles achieved the largest reduction in all of single measures. The light-duty vehicle elimination can effectively reduce CO emission, and the contribution rate was 89.4%; Similarly, the heavy-duty vehicle elimination can reduce NO_x, HC and PM₁₀ effectively, and the contribution rate would reach 65.5%, 55.8% and 93.4% respectively. The implementation of new emission standard for heavy-diesel vehicle also had obvious effect, and the four kinds of pollutants can reduce effectively. The effect of the integrated scenario considering all the control measures was remarkable, the reducing rate of CO, NO_x, HC, PM₁₀ were 46.4%, 42.1%, 8.6% and 50.6% respectively.

Key words: motor vehicle pollution; scenario analysis; reduction; Beijing

近年来,我国机动车污染造成的大气环境质量问题突出^[1],尤其是大中城市已经呈现出煤烟型和汽车尾气复合型污染的特点。北京市作为我国的首都和政治文化中心,机动车使用量逐年增多。2012年北京机动车保有量就已突破500万辆,这对北京市的大气污染防治工作带来挑战。

目前国际上对机动车污染物排放控制主要分为对新车和对在用车的管理,国内外学者也就各种控制措施对环境的改善作用进行了一些研究,这些措施主要包括新车排放标准的实施^[2],老旧机动车的淘汰^[3],检测/维修(I/M)制度^[4]等。另外,

替代燃料和新能源汽车成为目前很多国家的研究热点,而北京作为“十城千辆”工程的示范城市,正积极推广纯电动车等新能源车的使用。国际清洁交通委员会(ICCT)对中国不同政策选择和实施情景进行了短期和较长期的分析评估^[5]。申威等^[6]运用排放情景分析系统对北京市1999~2010年的机动车污染问题做了预测。目前,北京加快了新车排放标准的实施步伐,同时,也加强了淘汰旧

收稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208010)

* 责任作者, 副教授, guoxiurui@bjut.edu.cn

车等其他控制措施的力度.而关于这些措施对未来北京市机动车控制效果的定量研究还较少,本文就此基于情景分析法,估算未来年份不同情景下污染物的减排量,以此表征控制措施的实施效果.

1 研究方法

依据北京市现行政策和未来规划设定不同的方案情景,以 2010 年为基准年,通过计算各情景下机动车污染物的排放清单,预测目标年份 2015 年和 2020 年的排放变化,从而总结各类控制措施的减排效果.

1.1 排放清单的建立

机动车排放清单的建立主要依据排放因子法^[7],计算方法如下:

$$Q_n = \sum_i \sum_j \sum_k P_{i,j,k} \times VKT_{i,j} \times EF_{i,j,k,n} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: Q 为机动车污染物排放量,t/a; P 为机动车保有量,辆; VKT 为机动车年均行驶里程,km/a; EF 为机动车排放因子,g/(km·辆); n 为机动车排放污染物,包括 CO、NO_x、HC、PM₁₀; i 为车型,包括轻型客车、重型客车、轻型货车、重型货车 4 大类; j 为机动车燃油类型,本研究分为汽油、柴油、CNG 和电动 4 类; k 为机动车排放标准,包括国 0、国 I、国 II、国 III、国 IV、国 V、国 VI 共 7 类.

1.1.1 机动车保有量预测 本文研究的机动车指的是民用汽车.统计年鉴当中将民用汽车分为载客汽车(大、中、小、微型客车)、载货汽车(重、中、轻、微型货车)和其他汽车(三轮车、低速货车和其他专用车).鉴于北京市其他汽车比例极小,本文暂不考虑.将载客汽车和载货汽车按照年鉴做规整分为轻型客车、重型客车、轻型货车、重型货车.

机动车保有量在现实当中与很多因素有关,其中人均收入对其起到决定性的作用.本文在计算过程当中使用人均 GDP 代替人均收入,以此得到更高的拟合度.已有数据表明^[8-9]机动车保有率(人均机动车保有量)随人均 GDP 呈 S 型曲线增长,并可以用 Gompertz 曲线表达.建立 Gompertz 方程表达式^[10]为:

$$V(x) = \gamma e^{\alpha \exp(\beta x)} \quad (2)$$

式中: $V(x)$ 为机动车保有率,辆/千人; x 为人均 GDP,元/人; α 、 β 为待估参数; γ 为机动车保有率的饱和水平.对于 γ 的设定,目前没有公认的技术方法,国际上一般将工业化国家的 γ 值设定为 0.62,但由于国家间的社会经济状况和政策限制问题,特别是人口密度和生活习惯影响,一些国家或地区远没有达到这个水平.由于北京目前机动车的限购和限行政策以及其容纳水平,参照东京纽约等人口密度比较大的城市状况,设定其 γ 值为 0.35.

搜集统计年鉴当中 2000~2011 年的常住人口数量、GDP、民用机动车保有量^[11],计算每年的人均 GDP(不变价)和机动车保有率,通过数据拟合得到参数 $\alpha = -5.76$ 、 $\beta = -0.33$.假设未来北京市 GDP 每年按照 8% 的速度增长,常住人口线性增长,以此得到未来 2012~2020 年人均 GDP.通过 Gompertz 模型计算得到未来年份机动车保有率,进而得到机动车保有量的预测值.

1.1.2 排放因子 目前国内主要是运用国外的机动车模型进行本地化修正来得到排放因子,北京大学谢绍东等^[12]应用 COPERT 模型,根据中国机动车实际构成、行驶工况和燃油特征确定了模型所需参数,然后应用该模型计算得到了 2002 年中国机动车排放 CO、NO_x、NMVOC 和 PM 的排放因子.蔡皓等^[13]应用 COPERT 模型计算得到中国不同车型不同排放标准的排放因子.本文通过以上和其他资料调研以及修正,得到北京市分车型分燃料分排放标准的 CO、NO_x、HC 和 PM₁₀ 的国 I~国 IV^[13]、国 V~国 VI^[12]以及 CNG 车^[14-15]和电动车^[16]的排放因子,其中国 V 和国 VI 的排放因子参考欧五和欧六的排放限制进行比例修正.

1.1.3 活动水平 国内缺乏燃料和排放标准的保有量分类统计.因此,本文对基准年机动车保有量在年鉴数据基础上做进一步处理:(1)分车用燃料机动车保有量比例依据交管部门提供的数据,轻型货车汽油柴油比例为 14:11,其他车型均使用单一燃油,重型车为柴油,轻型车为汽油;(2)分排放标准机动车保有量根据文献^[7]调研得到,具体比例如图 1 所示.

经过调研获得基准年北京市机动车年均行驶里程,轻型客车为 23479km/a,重型客车为 66466km/a,轻型货车为 44000km/a,重型货车为 62433km/a^[7],未来年均行驶里程根据历史趋势进行外推,轻型客车逐年递减,其他车型逐年上升.另外,在计算未来年份机动车排放清单时,假设新注册车辆分车型和分燃料比例沿袭基准年的比例.

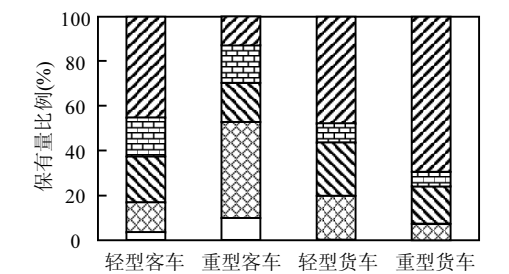


图1 基准年北京机动车分排放标准保有量比例
Fig.1 Population proportions of vehicles with different standards in base year in Beijing

国0 国I 国II 国III 国IV

1.2 情景设置

为了研究各种控制措施的实施对污染物排放量的影响,本文就将来可能在机动车排放标准、在用车管理、替代能源的使用等方面采取的措施设定相应情景,并与现有管理措施情景(基准情景,BAU)进行比较.基准情景当中只考虑现有的车辆燃油水平和排放标准,这样做的目的是使措施情景达到的减排量不受其他外因影响.针对北京市未来可能推进的新车排放标准销售时间设定排放标准改善情景.而对于高排放车淘汰措施,结合北京市目前状况和淘汰潜力,设计了两种选择,改善淘汰情景和强化淘汰情景.考虑未来替代能源利用趋势和北京市相关政策,设置的替代能源车情景分为天然气车情景和电动车情景.综合情景是将研究的所有控制措施进行有效结合,并考虑其综合减排能力.由于北京市目前不发展轻型柴油车,其保有量也相对较少,所以情景设置当中轻型柴油车都暂时考虑为不发展.各情景具体设置见表1.

表1 情景设置说明
Table 1 Scenarios designed

情景	情景描述
基准情景	以2010年为基准年,机动车保持现有排放标准,不实施额外措施,即沿袭2010年的排放标准,轻型车和公交邮政车实施国IV标准,其他重型车实施国III标准
排放标准改善情景	从2013年开始,轻型车实施国V标准,重型车实施国IV标准;从2017年开始,轻型车实施国VI标准,重型车实施国V标准
改善淘汰高排放车情景	2015年底前,淘汰黄标车及其他高排放老旧机动车共40万辆 ^[17] ,到2020年底实现高排放车占5%
强化淘汰高排放车情景	较改善情景提前两年淘汰黄标车及其他高排放老旧机动车共40万辆,2015年底前再淘汰30万辆,到2020年底再淘汰90万辆 ^[18] ,实现高排放车占1.3%
替代能源车情景-天然气车	新增的公交车均采用CNG
替代能源车情景-电动车	电动轻型客车2015年达到4万辆,2020年达到10万辆 ^[19] ;新增的公交车50%采用电动;新增邮政车为电动车
综合情景	从2013年开始轻型车实施国V标准,重型车实施国IV标准;从2017年开始轻型车实施国VI标准,重型车实施国V标准;2015年底前,淘汰黄标车及其他高排放老旧机动车共40万辆,到2020年底实现高排放车占5%;新增的公交车50%采用CNG,50%采用电动;电动轻型客车2015年达到4万辆,2020年达到10万辆;新增邮政车为电动车

2 结果与讨论

2.1 基准情景

依据现有机动车排放水平和机动车保有量的增长趋势,计算基准情景的目标年份机动车排

放清单.图2为基准情景污染物的排放趋势.从图2可看出,随着机动车保有量的不断增长,污染物的排放量有明显增加.图3为基准情景下各车型的污染物分担率,可以看出,CO和HC主要来自于轻型车,而NO_x和PM₁₀主要来自于重型柴油车,

而且其分担率有上升的趋势。

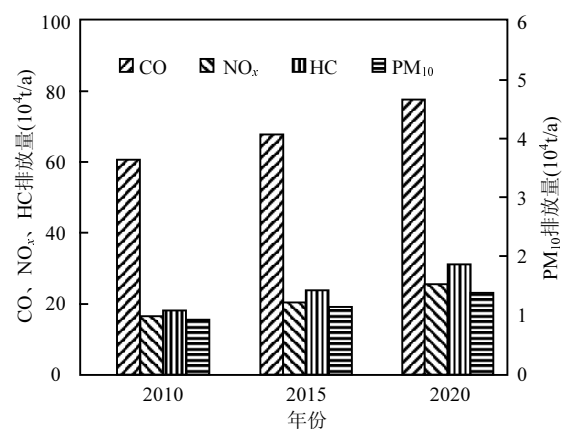


图 2 基准情景污染物排放趋势

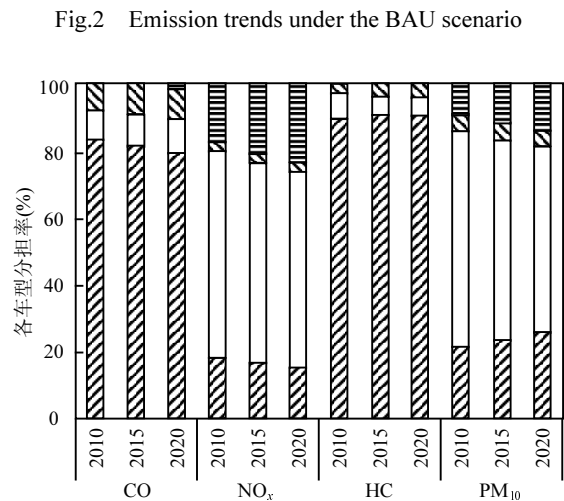


图 3 基准情景各车型污染物分担率

Fig.3 Contributions of different types of vehicles to vehicular emission under the BAU scenario

2.2 控制措施情景

根据机动车车队组成及其活动水平,计算目标年份各情景大气污染物(CO、NO_x、HC、PM₁₀)的排放清单,下面就不同控制措施情景下的污染物减排情况进行逐一分析。

2.2.1 排放标准情景 实施新的排放标准后,2015 年和 2020 年,各车型污染物较基准情景减排比例见图 4.可看出,2020 年的减排比例要大于2015 年,说明实施更加严格的排放标准可以增强减排效果.并且,实施新的排放标准对重型柴油

车的污染控制比较有明显的效果,且 4 种污染物均能得到有效削减.其中,2020 年 CO 减排 27.6%,NO_x减排 10.9%,HC 减排 16.0%,PM₁₀减排 14.1%.相比较,轻型汽油车除了 NO_x 得到明显减排以外,其他污染物几乎没有减排,这与排放标准的限值有关,轻型汽油车国 V、VI 标准当中的 CO、HC 排放限值较国 IV 标准没有较大改变,而汽油车 PM₁₀ 的原始排放就已经很低.重型车从国 III 到国 IV,再到国 V,各种污染物的排放限值更加严格,尤其是 PM₁₀ 的国 IV、V 标准比国 III 减少了 80%左右。

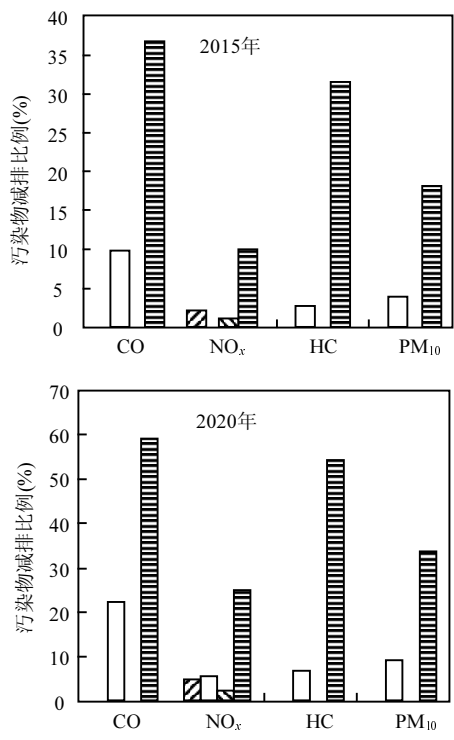


图 4 排放标准改善情景下各车型污染物较基准情景减排比例

Fig.4 Emission reduction of different types of vehicles under the emission standards updating scenario

2.2.2 淘汰情景 淘汰高排放车将有效削减污染物的排放.就短期而言,强化方案明显比改善方案效果显著.2015 年改善淘汰政策对 CO、NO_x、HC、PM₁₀ 的减排量分别达到 24.9%、25.2%、

6.4%、39.0%,而强化淘汰政策对 CO、NO_x、PM₁₀ 的减排量要在改善基础上多 8.4%、1.7%、0.7%。而到 2020 年,两种情景的削减效果差别不大.由于各车型保有量和污染物分担率的不同,各车型对各种污染物的减排贡献也不同,见图 5.从图中可以看到,改善情景下,2020 年轻型客车的减排贡献率比 2015 年有所上升;强化情景下,2020 年除了对 CO 之外,轻型客车减排贡献率也比 2015

年高.说明后期对轻型客车的淘汰需更加重视,因为淘汰国 I 甚至国 II 车对减排会有更大的效果.对 NO_x、HC 和 PM₁₀ 的减排当中,重型客车的贡献最大,2020 年,减排贡献分别达到 65.5%、55.8%、93.4%.而对 CO 的减排贡献最大的是轻型客车,达到 89.4%.这主要与轻型客车在整个机动车队伍当中占很大的比例以及重型客车的 NO_x 和 PM₁₀ 的排放量高有关.

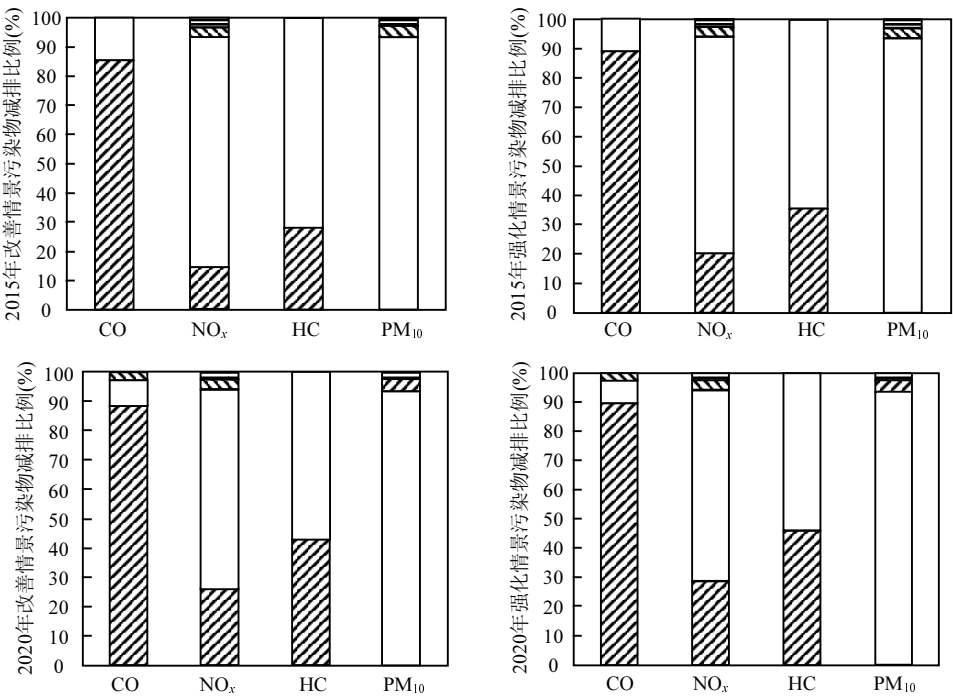


图 5 淘汰情景各车型减排贡献率
Fig.5 Reduction contributions of different types of vehicles under the elimination scenario
▨ 轻型客车 □ 重型客车 ▩ 轻型货车 ■ 重型货车

2.2.3 替代能源情景 由于情景设置的天然气替代方案只针对公交车,而公交车在北京市整个机动车队伍当中的比重很小,所以减排量不是很明显.但削减强度不容小觑.改善仅占北京市 0.5%的公交车的燃料,可以使 NO_x 和 PM₁₀ 分别削减 3.0%和 1.4%。
推广使用轻型电动车可有效改善 CO、NO_x、HC 的排放,在 2020 年可以分别减排 3288.5、234.9、3640.8t,而对重型车电动化可以削减 NO_x 和 PM₁₀ 的排放,其减排量可以达到 4105.5t 和

50.5t.若考虑电力的上游排放,电动车并不是完全意义上的零排放车辆,有必要对其进行全生命周期评价.依据生命周期的概念,美国阿贡国家实验室提出的“从井到轮”(well-to-wheel,WTW)评价体系,将车用燃料系统分成燃料生产(well-to-Tank,WTT)和机动车使用(Tank-to-Wheel,TTW)两个阶段,研究机动车燃料整个生产和使用过程中的能源消费、燃料经济性、相关的污染物排放和温室气体排放^[20].针对电动车的全生命周期评价,本文做了初步估算.结果显示,WTW 体

系的排放量要比 TTW 阶段的排放量高.其中,CO、NO_x、HC、PM₁₀的排放量分别多出 84.5t/a, 685.1t/a,51.3t/a,153.9t/a.尽管如此,电动车 WTW 体系的污染物排放量仍旧比仅考虑 TTW 阶段的传统燃料机动车排放量低.充分说明,电动车的推广使用具有相当大的减排潜力.

2.2.4 综合情景 将新车排放标准和在用车淘汰措施以及推广替代燃料机动车等措施综合应用,对各种车型的污染物排放都有显著的削减作用.每种车型的污染物减排贡献率如图 6 所示.结果显示,重型车的 CO、HC 和 PM₁₀ 得到大幅度减排; NO_x 在每种车型当中均得到一定程度的减排; 而轻型车的 HC 和 PM₁₀ 减排量很少,这与其原始排放量已经很少有关.而考虑每种污染物在机动车队当中的排放份额,2020 年,轻型车的 CO 减排贡献率最大,达到 79.3%;而 PM₁₀ 和 NO_x 的减排主要来自于对重型车的控制,重型车对这两种污染物的贡献率分别达到 97.3%和 80.8%.

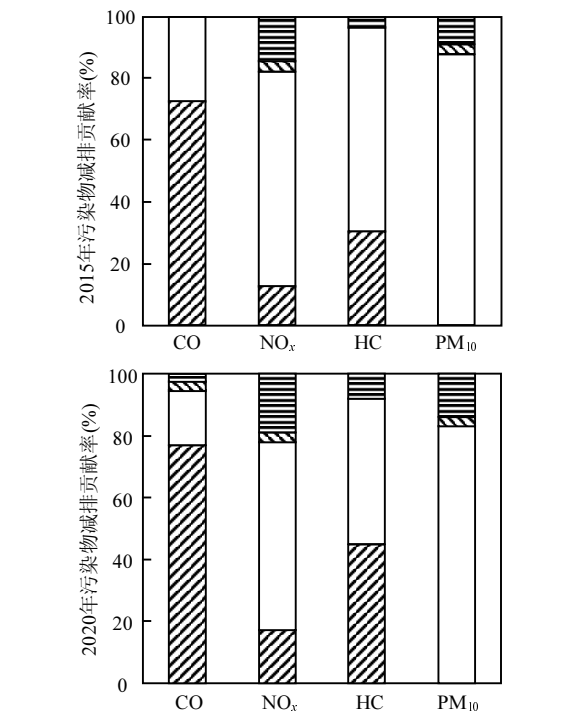


图 6 综合情景各车型减排贡献率

Fig.6 Reduction contributions of different types of vehicles under the integrated scenario

轻型客车 重型客车 轻型货车 重型货车

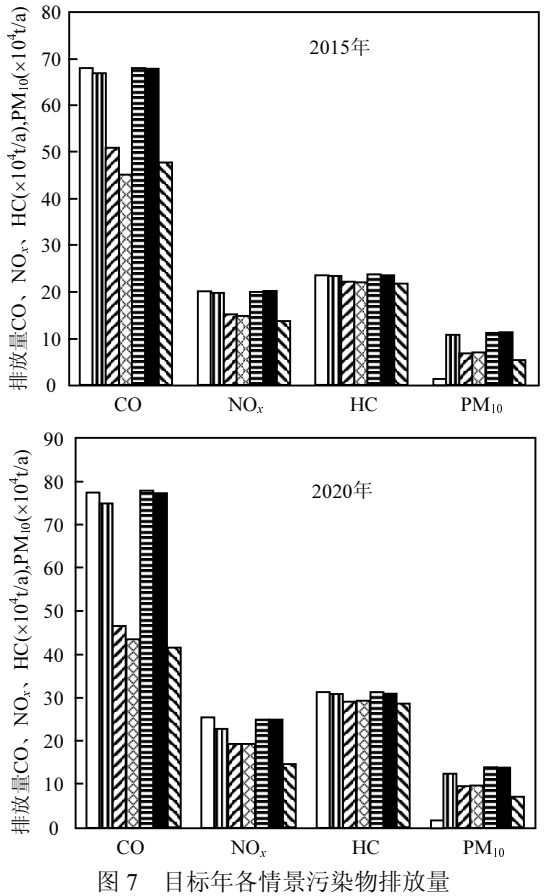


图 7 目标年各情景污染物排放量

Fig.7 Pollutant emission under the various scenarios

基准情景 排放标准改善情景 改善淘汰情景 强化淘汰情景 天然气汽车情景 电动车情景 综合情景

各情景大气污染物(CO、NO_x、HC、PM₁₀)的排放量汇总结果如图 7 所示.相比较于基准情景,各种控制情景对污染物排放量都有一定程度的削减.从图 7 可以看出,随着措施力度的加强,2020 年控制措施的减排强度要大于 2015 年,表明控制措施的实施效果会随着年限的增加愈加明显.单一控制措施当中,淘汰高排放车对污染减排效果最明显,并且能够同时对四种污染物达到大幅度减排的作用.对 CO 的削减效果最明显的控制措施是淘汰旧车,2020 年,强化情景和改善情景减排量分别为 43.9%和 39.9%,而实施新的排放标准可以减少 3.3%,电动车和天然气的使用达到的减排量很少;同样,2020 年,对 NO_x 的削减效果从大到小的控制措施依次为强化淘汰情

景(24.4%)、改善淘汰情景(23.6%)、排放标准情景(9.9%)、天然气情景(1.8%)和电动车情景(1.7%);对于 HC,削减效果比较明显的是淘汰旧车(6.6%)和电动车的使用(1.8%),其他措施收效甚微(新排放标准 0.9%和天然气标准-0.4%);对 PM_{10} 的削减效果明显的措施是淘汰旧车(31.5%)和实施新的排放标准(10.2%).综合情景由于是综合考虑新车和在用车的管理以及替代燃料的使用,因此减排效果较单一措施情景效果显著,对 CO 、 NO_x 、HC、 PM_{10} 的削减效果分别达到 46.4%、42.1%、8.6%和 50.6%.另外,2015 年,由于综合情景中淘汰高排放车的力度相当于改善淘汰情景的力度,且轻型客车占有相当大的比重,所以对于 CO 的减排,强化淘汰情景的力度要稍大于综合情景.

3 结论

3.1 综合措施情景下,对 CO 、 NO_x 、HC、 PM_{10} 的削减效果分别达到 46.4%、42.1%、8.6%和 50.6%.应尽可能的采取多种措施综合治理机动车污染,这样可以对每种常规污染物实现最大限度的减排.

3.2 淘汰高排放轻型客车可有效减少 CO 的排放,减排贡献率为 89.38%;淘汰高排放重型客车可对 NO_x 、HC 和 PM_{10} 达到有效削减,其贡献率分别为 65.5%、55.8%、93.4%.实行有针对性的高排放车淘汰可以有效减少目标污染物的排放.

参考文献:

- [1] 姚志良,张明辉,王新彤,等.中国典型城市机动车排放演变趋势[J]. 中国环境科学, 2012,32(9):1565-1573.
- [2] Wu Ye, Wang Renjie, Zhou Yu, et al. On-road vehicle emission control in Beijing: past, present and future [J]. Environmental Science Technology, 2011,45:147-153
- [3] Spitzley D V, Grande D E, Keoleian G A, et al. Life cycle optimization of ownership costs and emissions reduction in US vehicle retirement decisions [J]. Transportation Research Part D, 2005,10:161-175.
- [4] Moghadam A K, Livernois J. The abatement cost function for a representative vehicle inspection and maintenance program [J]. Transportation Research Part D, 2010,15:285-297.
- [5] ICCT.中国机动车排放控制措施评估成功经验与未来展望 [R].

北京:国际清洁交通委员会, 2010,12

- [6] 申 威,张阿玲.用排放情景分析系统研究北京市机动车污染问题 [J]. 城市环境与城市生态, 2001,14(4):31-33,46.
- [7] Lang Jianlei, Cheng Shuiyuan, Wei Wei, et al. A Study on the Trends of Vehicular Emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2012,62: 605-614.
- [8] Darga Y J, Gatel Y D. Vehicle ownership to 2015: implication for energy use and emissions [J]. Energy Policy, 1997,25(14):1121-1127.
- [9] Darga Y J, Gatel Y D. Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960-2015 [J]. Transportation Research Part, 1999,A(33):101-138.
- [10] 古继宝,元芳芳,吴剑琳.基于 Gompertz 模型的中国民用汽车保有量预测 [J]. 技术经济, 2010,29(1):57-62.
- [11] 中国国家统计局.中国统计年鉴,2000-2011 [R]. 北京:中国国家统计局, 2000-2011.
- [12] 谢绍东,宋翔宇,申新华.应用 COPERTIII模型计算中国机动车排放因子 [J]. 环境科学, 2006,27(3):415-418.
- [13] 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.
- [14] 韩金丽,杨永慧,张 悦.北京市发展天然气汽车的探讨 [J]. 煤气与热力, 2011,31(4):11-20.
- [15] 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.
- [16] 刘 宏,王贺武,罗 茜,等.纯电动汽车生命周期 3E 评价及微型化发展 [J]. 科技与经济, 2007,6:45-48.
- [17] 北京市政府.北京市清洁空气行动计划 [Z]. 北京:北京市政府, 2011.
- [18] 北京市政府.北京市 2012—2020 年大气污染治理措施 [Z]. 北京:北京市政府, 2012.
- [19] 北京市发改委.北京市“十二五”时期新能源发展建设规划 [R]. 北京:北京发改委, 2011.
- [20] Wang Michael. Development and Use of the GREET Model to Estimate Fuel—Cycle Energy Use and Emission of Various Transportation Technologies and fuels, Center for Transportation Research [Z]. Argonne National Laboratory, A-4L/ESD-31, 1996.

作者简介: 郭秀锐(1976-),女,山西临猗人,副教授,博士,主要从事环境污染防治与规划管理研究.发表论文 30 余篇.