

美国能源基金会资助项目

Funded by Energy Foundation

北京市替代燃料车 发展战略研究

北京市可持续发展科技促进中心
清华大学环境科学与工程学院

目 录

前 言.....	1
第一章 替代燃料车发展综述.....	2
1.1 研究背景	2
1.1.1 机动车保有量的增长及其影响	2
1.1.2 北京市机动车污染现状简述	3
1.2 替代燃料车研究现状	3
1.2.1 燃气和生物质燃料汽车技术的发展	5
1.2.2 电动汽车技术的发展	10
1.3 研究路线	13
第二章 替代燃料车的费用效果分析.....	19
2.1 车辆排放削减的费用效果计算方法	19
2.2 燃料种类和车型的初步确定	21
2.3 轻型车应用替代燃料的费用效果分析	23
2.3.1 应用案例简介	23
2.3.2 费用效果分析	28
2.4 公交车案例费效分析	34
2.4.1 应用案例简介	34
2.4.2 费用效果分析	43
2.5 卡车应用替代燃料的费用效果分析	50
2.5.1 应用案例简介	50
2.5.2 费用效果分析	54

2.6 替代燃料车费用效果分析结论	60
第三章 北京市燃气汽车发展规划研究	64
3.1 国内外燃气汽车的发展情况研究	64
3.2 北京市燃气汽车发展现状	68
3.2.1 单一天然气公交车	69
3.2.2 改造汽油—LPG 双燃料车	73
3.2.3 原产汽油—LPG 双燃料车	75
3.3 北京市机动车排放和污染现状	76
3.3.1 MOBILE5 模型原理与计算方法	77
3.3.2 PART5 模型原理与计算方法	79
3.3.3 北京市 2000 年机动车排放清单的建立	80
3.3.4 北京市 2000 年大气质量状况	83
3.4 北京市机动车发展和排放量预测	83
3.4.1 未来 20 年北京市机动车保有量预测	83
3.4.2 北京市机动车分车型保有量预测	88
3.4.3 基准方案 (BAU) 机动车排放量预测	89
3.5 北京市 2008 年燃气汽车发展规划	92
3.5.1 几种燃气汽车的排放因子预测	92
3.5.2 2008 年天然气汽车发展方案规划	96
3.5.3 2008 年液化石油气汽车发展方案规划	103
3.6 发展燃气汽车的一些相关问题	105
3.6.1 燃料质量	105

3.6.2	替代燃料车和发动机的原始设备制造商 (OEM)	106
第四章	北京市电动汽车发展规划研究	111
4.1	国内外电动汽车的发展情况研究	111
4.1.1	国外的发展情况研究	111
4.1.2	国内应用案例研究	113
4.2	北京市 2008 年电动汽车发展规划	114
4.2.1	发展电动汽车的总体思路	114
4.2.2	几种电动汽车的排放因子预测	115
4.2.3	电动汽车发展方案一	116
4.2.3	电动汽车发展方案二	118
4.3	对国内发展混合动力技术的一点建议	119
第五章	北京市生物质燃料车发展规划研究	122
5.1	国内外生物质燃料车的发展情况研究	122
5.1.1	国外的发展情况研究	122
5.1.2	国内应用案例研究	125
5.2	2008 年生物质燃料车发展方案规划	126
5.3	北京市 2020 年替代燃料车发展规划	128
5.3.1	基准方案 (BAU) 排放量预测	128
5.3.2	替代燃料车发展方案规划	131
5.4	发展替代燃料车的一些相关问题	132
5.4.1	对制定 “清洁燃料车” 标准的建议	132
5.4.2	替代燃料的零售价格	134

第六章	发展替代燃料车的环境影响研究	137
6.1	不同发展方案的污染物排放削减效果	137
6.1.1	2008 年替代燃料车发展方案一	137
6.1.2	2008 年替代燃料车发展方案二	138
6.1.3	2020 年替代燃料车发展方案	140
6.1.4	各方案下机动车排放的比较总结	140
6.2	对北京市空气质量改善状况比较	141
6.3	2008 年重点街区空气质量改善分析	144
6.3.1	CALINE4 模型的基本原理和计算方法	145
6.3.2	CALINE4 模型的应用	148
6.3.3	重点街区空气质量改善模拟	149
第七章	结论和建议	155
7.1	结论	155
7.2	建议	158

前 言

本项目由美国能源基金会资助，目的是针对北京市正在进行的能源结构改造，开展交通问题的研究。本研究中提到的替代燃料车，指有别于传统汽油车和柴油车，使用各种替代燃料的车辆。按照美国能源政策法案（EPACT）的定义，替代燃料（Alternative Fuel）包括：天然气、液化石油气、氢气、甲醇、乙醇、其他醇类、醇类和汽油的混合物、非醇类生物燃料和电力。汽油车和柴油车，包括其日新月异的排放控制技术，在本研究中将作为替代燃料车比较的基准，而不展开详细的讨论。

从世界各国的发展情况来看，开发应用替代燃料的推动力除了保护环境外，更重要的是能源战略的调整。对于北京市而言，发展替代燃料车已经有一段时间，其出发点主要是为减少机动车排放污染，改善北京市的空气质量。因此，本研究在考察国内外替代燃料车发展的各种经验和教训后，将主要以改善北京市的空气质量为目的，根据模型计算得到的机动车排放现状评估和发展预测，结合北京市能源结构的总体发展规划、已有和可能具备的基础设施条件，以及各种替代燃料车技术的最新进展，提出北京市2008年和2020年的替代燃料车发展规划。研究也会考虑替代燃料车在全生命周期中的排放，以及对区域和全球大气环境的影响，但主要将为保证北京市的“绿色奥运”目标，尽可能降低机动车排放的局地影响。

国内在“九五”期间启动了“清洁汽车行动”。最初替代燃料车被等同于“清洁燃料车”，在经历了一些经验和教训后，人们开始对此提出置疑。为明确“清洁燃料车”的定义，本研究也将参考国内引入欧洲的新车排放标准的做法，提出随欧洲3号排放标准同期引进欧洲的EEVs（加严型环境友好车辆）标准，作为“清洁燃料车”的自愿性标准。

替代燃料车的发展，涉及了方方面面的问题，由于人力物力的限制，本研究无法一一考虑到。这份报告希望通过研究人员有限的学识，能为北京市替代燃料车的发展规划提出一些有效的建议，为改善北京市的空气质量，最终实现“绿色奥运”的目标尽一份微薄之力。

第一章 替代燃料车发展综述

随着北京市经济的快速发展，机动车保有量迅速增加，城市机动车排放已成为大气污染的主要来源之一，必须采取相应措施加以治理和控制。替代燃料车（AFV）技术是从环境效益和能源战略角度考虑，开发使用清洁能源驱动的交通工具，以达到减少机动车污染排放、节省传统车用燃料的目的。

1.1 研究背景

1.1.1 机动车保有量的增长及其影响

进入二十一世纪，全球的城市化进程正以前所未有的规模和速度进行，而发展中国家的城市化速度高出发达国家3~4倍。到2025年，亚洲和非洲地区的城市人口将会翻一番，全球将有2/3的人口住在城市地区。城市化进程直接导致了人们对机动车需求的快速增长。以往的经验研究表明，机动车保有量的增长比人口的增长快得多。在1950年，全世界只有5000万辆汽车，大约每1000人仅有两辆汽车；而到1995年，全球已拥有6.5亿辆汽车，平均每1000人拥有100辆汽车；根据目前的估计，到2010年，汽车总保有量(不包括二轮和三轮的机动车)将超过8亿辆。目前世界上大部分的汽车集中在富裕的地区，而发展中国家的汽车拥有率要低得多，但其汽车保有量的增长速度最快。

随着城市化进程不断加快和机动车保有量迅速增加，机动车排放的污染物对城市大气环境造成的影响日益严重。调查表明，城市大气污染超标严重的区域往往集中于人口稠密、道路网密集、交通繁忙的地区，这反映出城市大气污染同机动车排放具有较高的相关性。人们对机动车排放污染的关注始于1950年前后，在此之前工业污染排放和煤燃烧排放是影响空气质量的主要因素。在美国，当城市地区主要的采暖用煤被天然气取代后，机动车排放的问题逐渐显露出来，最著名的例子是四十年代发生在洛杉矶地区的光化学烟雾事件，而经过这么多年加州对机动车排放污染的严格控制和治理，洛杉矶的空气质量仍未得到彻底的改善。

传统汽油和柴油车尾气排放的主要污染物，包括CO、HC和NO_x等气态污

染物，以及PM。这些污染物除对人体健康产生直接的危害以外，它们在适合的光照和温度、湿度条件下，还会发生光化学反应，生成以臭氧和二次颗粒物为代表的二次污染物质，对人体健康可能存在更严重的危害。流行病学的研究表明，长期接触臭氧的人群，容易患慢性肺部疾病，PM₁₀ 浓度上升则与人群的发病率和死亡率密切相关。

1.1.2 北京市机动车污染现状简述

北京近十多年机动车保有量增长率达到 16.4%，到 2003 年 7 月底，北京市的机动车总保有量已达到 200 万辆。这不仅造成了城市交通状况的恶化，也同时带来了严重的大气污染问题。

北京市近年来虽大力发展交通基础设施建设，修建了四环和其它一些快速路，但对于缓解交通压力收效不大；城市道路环境的 NO_x 和 CO 等与机动车排放关系紧密的污染物浓度有一定程度的超标，根据监测和模型模拟数据，1995 年全市平均 NO_x 和 CO 排放的机动车分担率分别为 40.2%和 76.8%；而 O₃ 时均浓度超标时数从 1997—1999 呈现明显的递增趋势，有发生光化学烟雾污染的潜在可能。近期研究还表明，机动车尾气排放的 PM_{2.5}，尤其是碳黑，对大气能见度和人体健康都有着重要影响。这说明北京市的大气污染正由煤烟型污染向机动车尾气污染转化。

总的来说，目前北京市因机动车排放引起的大气污染比较严重，路边环境的 NO_x 和 CO 有一定程度的超标；NO_x 和 HC 等臭氧前体物排放的增加，有发生光化学烟雾污染的潜在可能；PM_{2.5} 排放的增加也成为日益关注的问题。

1.2 替代燃料车研究现状

由于机动车污染对城市环境和人体健康造成严重危害，世界各国都在采取相应措施来控制机动车污染。从可持续发展的交通体系的角度来看，可以采取的措施有很多种。首先是从控制交通需求着手，在城市规划时合理进行各功能区的布局，减少因为出勤、购物等日常活动带来的出行量；其次是大力发展公共交通，尽量共享资源，降低单位出行的能耗；再就是从降低交通工具自身污染排放的角度考虑，使用清洁能源以及安装排放控制设备等。替代燃料车就是

开发使用清洁能源驱动的交通工具，以达到减少机动车污染排放和节省传统机动车能源的目的。

按美国 1992 年通过的能源政策法案（Energy Policy Act, EPACT）定义，替代燃料（Alternative Fuel）包括：天然气、液化石油气、氢气、甲醇、乙醇、其他醇类、醇类和汽油的混合物、非醇类生物燃料和电力。一般来说，替代燃料可减少污染物排放，或节约不可再生能源。表 1-1 列出部分比较常用的替代燃料及其物化特性。

表 1-1 传统燃料与部分替代燃料物理化学性质比较（AFDC website）

性质		汽油	柴油	甲醇	乙醇	LPG	CNG
组成， 质量%	碳	85-88	84-87	37.5	52.2	82	75
	氢	12-15	13-16	12.6	13.1	18	25
	氧	0	0	49.9	34.7	—	—
低位热值(MJ/l@15.6℃)		32.1	35.8	15.8	21.2	23.6	5.5 ^a
高位热值(MJ/l)		34.8	38.7	17.9	23.4	25.4	—
比重(@15.6℃)		0.72-0.78	0.81-0.89	0.796	0.796	0.508	0.424
沸点(℃)		27-225	188-343	65	78	-42	-162
辛烷值（R+M/2）		86-94	—	100	100	104	>120
理论空燃比（重量）		14.7	14.6	6.45	9.0	15.7	17.2
RVP(psi)		8-15	0.2	4.6	2.3	208	2400

注：

a. 为 163 个大气压（2400 psi）下的 CNG

为了缓解能源危机，减少机动车排放，世界各大汽车制造公司都致力于开发清洁燃料汽车。现有的技术中部分已经商业化，但整体仍然存在不足，很多技术还处于不断研究和完善中，同时研究人员也在继续开发更新的技术。

对一类替代燃料车，根据不同的技术又可进一步划分，比如燃料电池车主要包括的技术有：磷酸燃料电池（PAFC），熔融碳酸盐燃料电池（MCFC），固体氧化物燃料电池（SOFC），固体聚合物/质子交换膜燃料电池（SPFC/PEMFC）。

1.2.1 燃气和生物质燃料汽车技术的发展

燃气汽车主要包括天然气汽车和液化石油气汽车。实际使用中既有用单一燃料的专用车（Dedicated vehicle），也有与汽/柴油共用的双燃料车（Bi-fuel vehicle）或混合燃料车（Dual-fuel vehicle）。

天然气属高燃点轻质燃料，主要成分是甲烷（体积含量一般在 90%以上），也含有很少量处理过程中残余的大分子烃类，除了为用作燃料而进行的处理外，不需要进一步的精炼或化学处理，燃烧后一般没有烟灰。天然气比汽油易挥发，燃点比汽油高 1.7~5 倍，同样的条件下天然气比汽油更不容易自燃和爆炸，并且价格通常比汽油低 20~50%；辛烷值高，燃烧限宽，可燃烧稀混合气，以提高内燃机的经济性，不含铅、苯和芳香烃等有毒物质。

天然气被用作汽车燃料，始于二十世纪三十年代的意大利。在经历了七十年代的两次石油价格冲击后，人们又重新对天然气产生了兴趣（G. Luigi Cola et al. 2000）。全世界大约有 120 万辆车使用天然气，约占车辆总数的 0.18%。天然气中实际上不含硫，但为了安全，一般在处理过程中会添加几个 ppm 的硫醇，以使其带有气味。在作为车用燃料时，天然气一般会被压缩到 200 大气压附近，即压缩天然气（CNG），但有时也会采用低温液化处理技术，体积缩小为压缩前的 1/625，即液化天然气（LNG），以便提供高密度的能量，CNG 是天然气主流车型，LNG 一般用于重型车作为传统柴油的替代燃料。

作为车用燃料的液化石油气（LPG），其主要成分有丙烷、丙烯、丁烷和丁烯。液化石油气有两个来源，一是炼油过程中的副产品，二是生产天然气的副产品。液化石油气是石油在分馏过程中的副产品，其主要成分是丙烷、丙烯、丁烷和丁烯，着火温度 441°C~550°C，比车用汽油着火温度（427°C）高；辛烷值高达 103~105，故抗爆性能良好。

LPG 经蒸发减压器减压、气化后与空气均匀混合，混合气的形成和分配优于汽油，气缸与燃烧室内的积炭较少，LPG 燃料也不会冲稀缸内壁面上的润滑油，发动机的运转较平稳，使用寿命延长（Eva Liu et al. 1997）。此外，LPG 一般比汽油便宜，在需求量不是很大时容易获得，因此对于车队而言是较好的替

代燃料。

在车用燃料的选择方面，天然气和 LPG 各有利弊。在降低污染方面天然气优势较大，而且气质和市场供应都比较有可靠保障；但由于储罐容积所限，车辆使用 CNG 比使用 LPG 的续驶里程较短，不太适用于每日行驶里程较长的车辆使用；建设同样规模的 CNG 加气站，投资大约等于 LPG 加气站的 5 倍以上，且受到地理位置和管网条件等因素制约，给初期建设带来了较大的困难。

目前，燃气汽车的技术已经发展到第三代。第一代燃气汽车是在原有化油器式汽车上加装汽油/燃气转换开关，其工作原理对应于化油器式汽车，以采用机械式混合器为特征，同样存在各缸分配不均匀，调节精度差等缺点，是发展的初级阶段。与同类的汽油车相比，排放有可能得到改善但无法保证，且动力性损失较大；其排放水平尚达不到欧洲 1 号标准。第二代燃气汽车是在第一代的基础上对进气量进行简单的闭环控制，工作原理对应于电控化油器式汽车，控制精度高于第一代技术，可以匹配三元催化转化装置，部分是双燃料的改造车型，部分为专用燃气汽车。其排放性能有所改善，有可能达到欧洲 1 号排放标准，动力性比第一代也略有提高。第三代燃气汽车则采用多点电喷技术，工作原理对应于现在广泛使用的多点电喷汽油车，匹配闭环控制和专用三元催化转化装置，绝大部分为原始设备制造商（OEM）生产的专用燃气汽车。其排放有可能达到欧洲 3 号排放标准及美国加州超低排放车标准，动力性能接近同类汽、柴油车，但还存在差距。（潘一玲，1999）

DOE 的 NREL 在 1999—2000 年间对 Honda Civic、Ford F250、Dodge B2500 专用 CNG 车、GM Sierra 双燃料车和同类汽油车进行了排放测试比较，选择的车辆均采用燃油电子喷射技术（多点电喷/顺续多点电喷）和三元催化转化设备（天然气车的催化剂为专门设计），测试规程为 EPA 的 FTP。结果表明，专用 CNG 车均达到超低排放车（ULEV）标准，双燃料车和汽油车有部分污染物排放达不到 ULEV 标准，但可以达到低排放车（LEV）标准。其中，Ford 的 CNG 小型载货卡车比汽油车的非甲烷碳氢（NMHC）排放减少 97%，CO 减少 63%，NO_x 减少 81%，有毒物质减少 99%，CO₂ 减少 17%；而 Honda 的 CNG 轿车则比汽油车 NMHC 排放减少 96%，CO 减少 90%，NO_x 减少 69%，有毒物质减少 97%，

CO₂ 减少 26%。GM 的双燃料 CNG 小型载货卡车使用天然气或汽油和同类汽油车的排放水平相当，双燃料车的 NMHC 和 NO_x 排放比汽油车稍低，而使用 CNG 时的 CO 排放和使用汽油时的 CO₂ 排放高于汽油车（NREL 1999，2000）。

图 1-1 给出了欧洲使用 LPG 轻型车的经验。在 1970 年代末到 1980 年代初期，对机动车排放的控制不严，使用 LPG 的车辆很容易达到排放标准，而汽油车的排放则高得多。但自从在汽油车上引入电喷加三元催化转化系统以后，情况就发生了变化，设备生产商并不希望引入这种新的汽油车控制技术，因为 LPG 车辆在使用三元催化转化设备时没有优势，结果，到 1988 年的时候，汽油车的排放反而比 LPG 低了。后来，LPG 发动机生产商也开发了相应的燃料喷射控制系统，并配备尾气净化装置，使得 LPG 车也达到了和汽油车相同的排放标准。到 1995 年，汽油车和 LPG 车的排放差不多，前者的 CO 排放稍高，而 LPG 车的 NO_x 排放稍高，但相比以前都有了很大程度的降低。

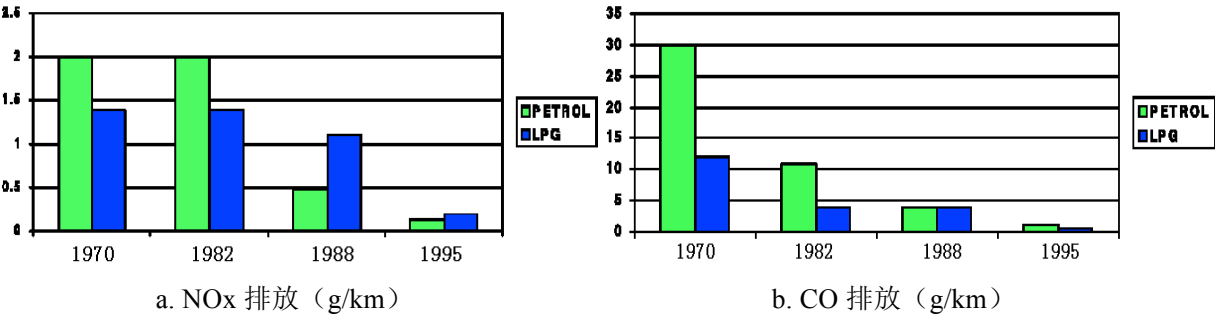


图 1—1 欧洲汽油和 LPG 轻型车的排放水平发展比较

甲醇和乙醇作为车用燃料都具有很好的动力性能，并和天然气一样，颗粒物质量排放较低，并有可能降低臭氧前体物（NO_x+NMHC）、有毒物质及 CO 等污染物的排放。甲醇和乙醇都能利用可再生能源制造，乙醇的生产主要是利用乙烯和制糖原料，生产甲醇的原料更是有很多种。醇类燃料的应用方式主要有三类：（1）在汽油车的燃料中添加低比例的醇类（如 5~22%的乙醇），主要是为了增加汽油的含氧量，对发动机没有特别的要求；（2）醇类在汽油中可以 0~85%的比例混合的灵活燃料车(FFV)，这种车辆曾在 20 世纪九十年代中期得到较大发展，但灵活使用燃料的同时，发动机便很难发挥出最佳性能；（3）使用纯醇类燃料的汽车，这主要是用于重型车辆，但对于单一成分的甲醇而言，

其蒸发压力低，启动性不好。甲醇和乙醇汽车的主要缺点在于续驶里程较短，甲醇汽车的甲醇和甲醛等有毒排放较高，而乙醇的高成本成为技术推广的主要障碍之一。NREL 在 1999 年对 Dodge Caravan 和 Ford Taurus 的两辆灵活燃料车和同类的汽油车进行了测试，车辆均采用多点电喷/顺序多点电喷技术，测试工况为 FTP，其中 FFV 在使用 E85（85%乙醇+15%汽油，体积比）和汽油的情况下接受了两组测试。结果表明，两辆 FFV 使用 E85 和汽油时的常规污染物排放都不比汽油车低，Dodge Caravan 的 FFV 使用 E85 时的 CO 排放甚至比汽油车高出 142%，而 Ford Taurus 的 FFV 使用 E85 时的 CO 排放也比汽油车高出 31%；但两辆 FFV 使用 E85 和汽油时的 CO₂ 排放均低于汽油车，使用 E85 时更为明显（NREL，1999）。

二甲醚（DME）在二十世纪九十年代受到人们的关注，成为柴油机的潜在替代燃料和燃料电池的一种燃料。DME 的十六烷值高于 55，排放的颗粒物和 NO_x 较少。其物理性质类似 LPG，常温加中等压力下呈液态；除了人造橡胶必须换成聚四氟乙烯外，DME 存储设备的设计与 LPG 相同，DME 对金属也无腐蚀作用。目前全世界 DME 的年产量约 15 万吨，尚未形成商业化。人们对 DME 的兴趣主要在于它用在柴油机上可减少污染物排放，而用在燃料电池上时，DME 没有碳链的性质使得它可在相对较低的温度下进行重组。现有的 DME 生产技术是甲醇的脱氢化，该过程分为两步独立进行，成本高，从能源利用的角度看效率较低。丹麦的一家公司开发了一种基于天然气重组的替代联合工艺并进行了示范生产，该技术与甲醇的生产非常类似，但到目前为止，还没有哪一家工厂利用这种技术进行 DME 的生产制造。对于 DME 的研究是在最近的五六年才开始兴起的，还有很多方面需要进一步的深入了解。

对于煤储量丰富的国家来说，用煤制造清洁能源是个很好的选择。利用费-托合成法(Fischer-Tropsch Synthesis)，可以由煤制得一氧化碳和氢气的混合气；再使用气体液化装置，在催化剂的作用下可将合成气转化为液态的碳氢化合物。南非已经有过煤制合成气，再制成交通燃料方法的商业化实践；在美国，由煤制造甲醇的途径进行过相当规模的示范工程。用煤制造燃料，主要是这些燃料用在柴油机、点燃式发动机或燃料电池上可以得到人们需要的性质，但生产过程一般做不到经济和能源的有效利用。

生物柴油是为柴油机使用的一种清洁燃料，由可再生能源如大豆油等制造。它可用作单一燃料或是和普通柴油以任何比例混合。生物柴油的典型制造工艺是在催化剂的作用下，将植物油或动物脂肪和醇类反应，生成甘油和生物柴油(化学名称为烷基酯)。生物柴油是一种理想的替代燃料，因为它可以象普通柴油一样在内燃机中使用而无需发动机的改造，并保持同等的有效载荷和续驶里程。生物柴油具有和普通柴油相近的热值、燃料经济性和性能，并由于更好的润滑性而使操作顺畅和减小发动机磨损，高燃点使得储存和操作更加安全。在传统柴油机上使用生物柴油，有可能降低碳氢化合物、一氧化碳和颗粒物的排放，氮氧化物的排放因发动机的负荷循环及测试方法的不同而呈现轻微减少或增加。生物柴油本质上也不含有害的芳香烃，对人体健康而言更加安全。

从上面的叙述中，可以初步得到以下结论：

- (1) 随着机动车排放控制技术的快速发展，对于采用同等发动机技术、燃料电控喷射技术(从开环单点电喷到闭环多点电喷，以及缸内直喷)和尾气净化技术(普通到冷启动、多级三效催化转化器等)的替代燃料车和轻型汽油车，两者的排放差别正在日益缩小，很多替代燃料车在污染物排放削减已经没有优势。
- (2) 相同的技术下，专用 CNG 汽车相比轻型汽油车在 HC、CO 和 NO_x 排放上仍有较大削减，但双燃料 CNG 汽车的排放水平则和汽油车相当；类似情况也发生在使用乙醇燃料的灵活燃料车身上。由于不同燃料在最佳压缩比等技术参数上存在的本质差别，双燃料或灵活燃料车相比专用燃料车很难达到最佳的燃烧状态，所以排放一般较高。
- (3) 无论专用、双燃料还是灵活燃料车，使用替代燃料如 CNG 和乙醇时的 CO₂ 排放都低于同类轻型汽油车，从减少温室气体排放的角度考虑是有益的。当然，使用 CNG 也存在甲烷排放大幅增加的问题，甲烷也是温室气体，而且甲烷分子的温室效应是 CO₂ 分子的 21 倍。
- (4) 除天然气、LPG、甲醇和乙醇外，二甲醚、煤制合成气和生物

柴油等替代燃料基本还处于研究和初步实践阶段，即使有少数
的应用案例，总体而言也不够成熟，可能出现的问题还比较多
。

上面仅就除电动车以外底替代燃料车和轻型汽油车进行了初步的比较，没有包括重型汽、柴油车。更为深入和详细的比较研究，将在后几章中继续进行。由于国内目前基本上还没有轻型柴油车（港、澳地区除外），所以本研究不准备讨论替代燃料车和轻型柴油车的比较。

1.2.2 电动汽车技术的发展

纯电动汽车(Electric Vehicles, EV)以蓄电池为能源，经过控制系统驱动电动机，带动汽车的驱动轮，提供行驶的动力。电动车舒适、干净，噪声很小，基本没有污染物的直接排放。但其有几个与蓄电池相关的重要问题对应用造成影响，一是蓄电量导致续驶里程十分有限，二是成熟技术的电池寿命一般较短，且不易回收，三是电池体积大，难以应用于小型汽车。有关电动车的研究起步较早，然而上述问题一直未能得到很好的解决，因而发展缓慢，目前已有一些大的汽车厂商在逐渐退出电动车市场，而转向发展混合动力车和燃料电池车。

混合动力车(Hybrid Electric Vehicles, HEV)是指具备两套不同推进系统的汽车，一般是同时拥有内燃机驱动和电动马达驱动的汽车，其优点在于扩充了汽车的行驶能力，没有像纯电动车每次充电后受续驶里程的限制，而可以像普通汽车一样长距离行驶，同时比内燃机汽车污染少，噪声小，能耗低。但由于其构造比较复杂，增加了电动马达驱动系统和附加电子控制元件等，成本上要高于同类内燃机汽车。

目前，HEV 的主要技术有 3 种：串联式、并联式和串联-并联混合式。串联式 HEV 实际上用电动马达驱动作为唯一的最终驱动方式，其内燃机效率大幅提高，尺寸减小很多，在低速和怠速的城市工况下表现出很大的优越性，但串联式 HEV 的蓄电池/电动马达系统体积较大，且在高速行驶工况下效率反而不及内燃机汽车。并联式 HEV 中内燃机和电动马达都能驱动车轮，低速工况下主要采用电动马达驱动，而高速行驶时用内燃机驱动，从而在不同工况下都能达到高

效率，并且蓄电池系统的尺寸比串联式 HEV 小，虽然并联式混合动力车的驱动系统比串联式复杂，但总体成本却便宜。本田公司的 Insight 和 Civic Hybrid 两款 HEV 车型都采用了并联式技术。串联-并联混合式 HEV，顾名思义，是前两种技术的集成，使得各自的特点得到充分的发挥，能源使用效率相比单一串联式或单一并联式都要高，但同时驱动系统的复杂性和总体成本也增加了。目前丰田公司的 Prius HEV 采用了串联-并联混合式技术（王全录，2003）。

近年来，HEV 的发展非常迅速，市场化过程很快。在美国，混合动力轿车的价格相比同类汽油轿车，已经从 5、6 年前的高出 2 万美元左右（Anant D. Vyas,1997），降至目前的高出 2000~5000 美元（Timothy E. Lipman, 2003）。随着蓄电池和电动马达技术的日益成熟，电控元件的不断发展和成本下降，以及能源使用效率高和环境影响小等因素，HEV 在生产成本和价格上与同类汽油车将进一步缩小，而整个使用周期的平均成本很可能低于汽油车。

根据美国波士顿东北先进汽车学会(NAVC)对全球 42 位专家的调查报告（M.J. Bradley, 2000），对于混合动力车在未来的发展，目前存在完全不同的观点。一些专家认为混合动力车在严格意义上说，只是过渡车型；而另一些专家则相信混合动力车将在市场上对燃料电池车（Fuel Cell Vehicle, FCV）构成挑战；还有人认为混合动力技术的进步，也会推动燃料电池技术的发展。由麻省理工学院的研究人员新近开展的一份研究，得出的结论是在未来的 20 年内，混合动力车将比燃料电池车得到更广泛的应用。加州空气资源管理局最近也重新编排了它的积分目录，将混合动力车和燃料电池车放在同等重要的位置，而不再强调纯电动轿车和卡车。

燃料电池技术最早出现在 1959 年，但从 1990 年以后才有比较大的起步，是近年来研究的热点。其工作原理是将氢和氧结合时产生的化学能转化成电能，为发动机提供动力。燃料电池的构造和传统电池很相象，但它却不储存能量，而是连续供应燃料来转化为电能，这样就解决了纯电动车行驶里程受限的问题。FCV 的行驶和加速性能都接近汽油车，单车的能源使用效率可以达到后者的两倍，尾气排放中则基本只有水蒸气，属于零排放车。但目前 FCV 存在两个主要的问题尚待解决，一是其成本很高，美国 DOE 在加州伯克利开展的示范项目

中，购置 Ballard FCV 的单车费用为 310 万美元（另有 40 万美元的保险费），是当地柴油公交车价格的 10 倍以上。燃料的来源和存贮也存在很大困难，目前开发的 FCV 大多直接以氢气为燃料，而氢气的低能量密度导致其在储存和运输上都非常耗能，且氢气的燃料供应网络需要从头建设，也将是一个耗资巨大的工程。世界上很多大的汽车公司都已将 FCV 作为一个研发的重点，一些研究人员相信，在不久的将来，燃料电池的成本将大大降低。另一方面，鉴于氢气燃料在储存和运输上的困难，人们想出了几种解决办法，一是在加气站直接制氢（水电解法或其它），从而减去运输过程的成本和损失，但这种方法耗能和成本也较高，二是在 FCV 上加装一个制氢装置，用汽油或者甲醇等在车上制氢以供燃料电池使用，但这也导致了污染物排放和能源使用效率降低的问题。虽然燃料电池车的应用前景非常诱人，但目前还基本处于进一步研发和示范应用阶段，离市场化尚有一定的距离。

总结三类电动汽车在欧美日等发达国家的发展情况，可以看到：起步较早的纯电动车在经历了一段时期的发展后，由于最关键的车用电池问题一直未能得到很好的解决，开始逐渐退出市场；混合动力车由于不需要对燃料供应的基础设施增加投资建设，相比目前平均技术水平的汽、柴油车则能显著提高燃油经济性和降低污染物排放，近几年发展非常迅速，一些大的汽车厂商正致力于缩小混合动力车和汽、柴油车之间的成本差距，以进一步增加其市场竞争力；而燃料电池车虽然前景看好，但由于其高昂的成本，同时对氢燃料供应体系的基础设施建设投资要求很高，近十年内都可能不会有大的发展。

表 1-2 是英国的 A. Bauen 等研究人员（2000）从燃料生命周期的角度考虑，计算得到汽油车、柴油车、CNG 车、氢燃料车、燃料电池车以及纯电动车在污染物排放和能源消耗上的相对关系，可作为综合比较各类车型的参考。

表 1-2 不同种类车的污染物排放和能源消耗比较

车辆种类	CO 排放	NMHC 排放	NOx 排放	PM 排放	SOx 排放	CH ₄ 排放	能源 消耗
汽 油 车	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
柴 油 车	28%	33%	219%	489%	64%	72%	75%

CNG 车	2%	6%	39%	<0.5%	5%	277%	87%
氢燃料车	2%	7%	43%	1%	17%	364%	141%
甲醇 FCV	0.6%	6.1%	15%	14%	3%	169%	83%
天然气 FCV	0.3%	3%	9%	<0.5%	3%	137%	53%
汽油 FCV	0.4%	53%	30%	2%	68%	71%	71%
氢燃料 FCV	1%	3%	16%	<0.5%	7%	145%	56%
电动车(UKEM)	4%	1%	207%	496%	377%	722%	63%
电动车(CCGT)	4%	3%	67%	1%	32%	150%	54%

注：1)UKEM 即 UK Electricity Mix，电动车使用英国的混合电力网。

2)CCGT 即 Combined Cycle Gas Turbine，电动车使用联合循环燃气涡轮技术所发电力。

1.3 研究路线

本研究项目将从文献调研和信息收集开始，了解替代燃料车技术的最新进展，并对已有的技术进行分析。通过对不同类型替代燃料车的排放水平和费用效果进行研究比较，了解它们在排放控制上的先进程度，并结合北京市的自身情况和条件，确定适合北京市发展的替代燃料车类型，保证在北京市应用替代燃料车对改善空气质量和节约能源的效果。

研究项目将为北京市发展替代燃料车提出不同实施力度和控制水平的可行方案，并对提出的方案进行比较，强调对环境效益的改善状况，并以此向北京市政府和北京奥委会提供建议。这有助于政府管理部门采取最合理的方案来控制机动车污染排放，推动“绿色奥运”目标的实现，并为未来北京市替代燃料车发展提供依据和参考。

项目研究内容和成果主要将包括：

不同替代燃料车与传统机动车的费用-排放削减效果比较；

北京市替代燃料车发展规划方案的提出，和基于这些发展方案的排放清单；

替代燃料车发展方案对北京市空气质量影响。

通过以上研究工作，全面得出北京市发展替代燃料车计划及其对大气环境的改善结果，并据此向北京市政府和奥委会提供建议，为今后北京市替代燃料

车的发展给出参考和依据。项目总体规划设计如图 1-4 所示：

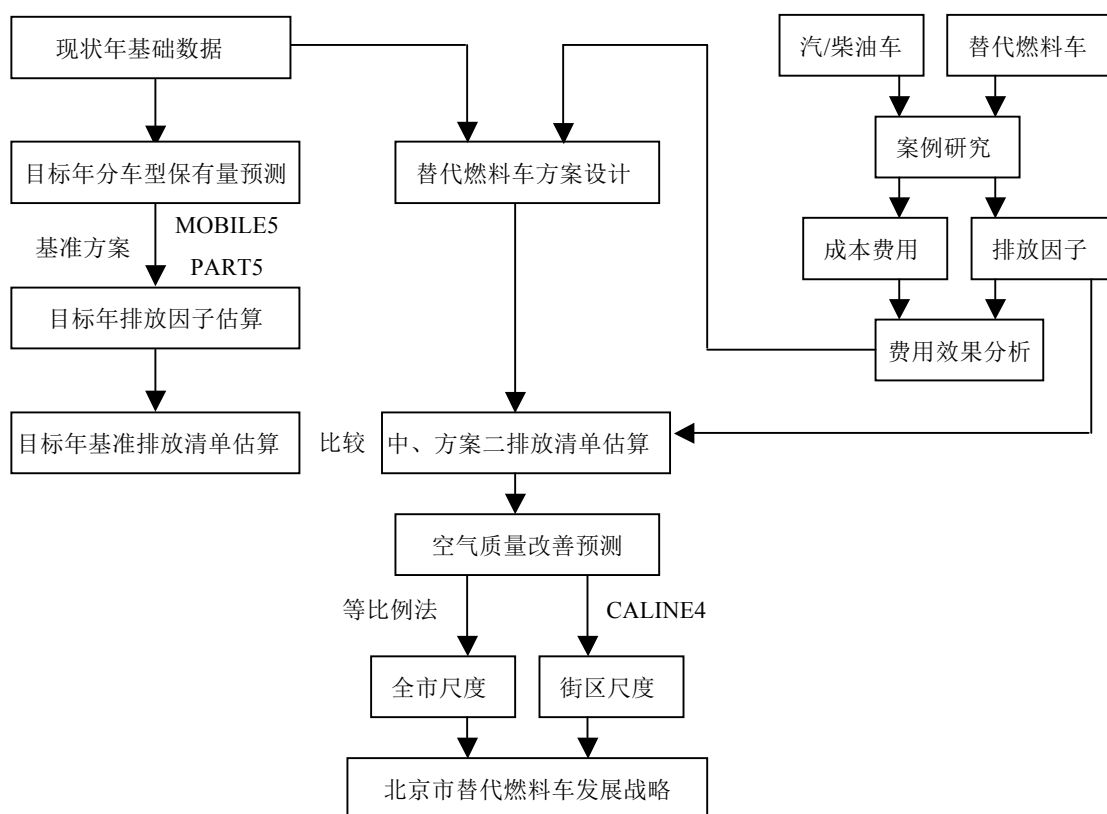


图 1-2 北京市替代燃料车发展战略研究技术路线图

参考文献

- [1] Thomas W. McDade, Linda S. Adair. Defining the “urban” in urbanization and health: a factor analysis approach. *Social Science and Medicine*, 2001, 53: 55～70
- [2] Patrick Wakely. The inclusive city. *The International Development Magazine*, 2000, 10: 8
- [3] 郝吉明、傅立新、贺克斌、吴烨. 城市机动车排放污染控制. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.1
- [4] Noel de Nevers. Air pollution control engineering (second edition). 清华大学出版社 & McGraw-Hill. 2000. 471~472
- [5] 《中国大百科全书·环境科学》编委会.中国大百科全书, 环境科学. 北京: 中国大百科全书出版社, 2002.5
- [6] Brauer M. et al. Ozone personal exposures and health effects for selected groups residing in the Fraser Valley. *Atmospheric Environment*. 1997, 31: 2113~2121
- [7] 庄国顺. 沙尘暴细颗粒物的理化特征及其对人体健康的影响. 香山科学会议论文集, 2002. 5: 28~35
- [8] 谢绍东, 张远航, 唐孝炎. 我国城市地区机动车污染现状与趋势. *环境科学研究*, 2000, 13(4): 22~25, 38
- [9] Wol., G.T.. Particulate elemental carbon in the atmosphere. *Journal of the air Pollution Control Association*, 1981, 31: 935~939
- [10] Hamilton, R.S., Mans.eld, T.A.. Airborne particulate elemental carbon: its sources, transport and contribution to dark smoke and soiling. *Atmospheric Environment*, 1991, 25: 715~723
- [11] <http://www.plexoft.com/SBF/F01.html>
- [12] APEC Secretariat. The role of petroleum based and alternative transport fuels in reducing emission in the APEC region. Canada: Levelton Engineering Ltd.

December 2000

- [13] 李颖, 侯志祥. 我国 21 世纪电动汽车发展的对策. 交通科技, 2002, 1: 39~40
- [14] M.J. Bradley, et al. Future Wheels: Interviews with 42 Global Experts on the Future of Fuel Cells for Transportation, Fuel Cell Infrastructure, and a Fuel Cell Primer. The Northeast Advanced Vehicle Consortium (NAVC), Boston. 2000
- [15] 中国技术创新网, <http://www.ctiin.com.cn>
- [16] A. Bauen, D. Hart. Assessment of the environmental benefits of transport and stationary fuel cells. Journal of Power Sources. 86(2000): 482~494
- [17] G. Luigi Cola, et al. 意大利的天然气汽车工业体系. 国际天然气汽车协会 2000 年横滨会议论文选集 (中文译本). 2000
- [18] Juan Carlos Fracchia. 阿根廷天然气汽车发展经验综述. 国际天然气汽车协会 2000 年横滨会议论文选集 (中文译本). 2000
- [19] 阿比旦等. 北京市发展燃气汽车的技术评估与对策研究. 公路交通科技, 2002, 19(2):28~30
- [20] NREL (1999a) . FACT SHEET: Bi-Fuel CNG Pickup, GMC Sierra. NREL/FS-540-26004
- [21] NREL (1999b) . FACT SHEET: Honda Civic, Dedicated CNG Sedan. NREL/FS-540-26005
- [22] NREL (1999c) . FACT SHEET: Ford F250, Dedicated CNG Pickup. NREL/FS-540-26519
- [23] NREL (1999d) . FACT SHEET: Dodge Caravan, Ethanol-Fueled Minivan. NREL/FS-540-26006
- [24] NREL (1999e) . FACT SHEET: Ford Taurus, Ethanol-Fueled Sedan. NREL/FS-540-26578
- [25] NREL (2000) . FACT SHEET: Dodge B2500, Dedicated CNG Van.

NREL/FS-540-27848

- [26] AFDC website : General Table of Fuel Properties.
<http://www.afdc.doe.gov/altfuels.html>

第二章 替代燃料车的费用效果分析

替代燃料车的费用效果分析是基于新技术的使用而带来的单车污染物排放削减和费用的增加，着重比较替代燃料车环境效益和经济成本之间的关系。

车辆排放削减的费用效果与应用的燃料类型和车型有很大关系。通过替代燃料车的排放测试和应用实例的研究报告，再结合各种车辆的燃料经济性、基础建设投资及维护费用等相关数据的调研结果，估算引入替代燃料车后带来的排放削减和成本增加，进一步得到各种替代燃料车的费用效果，确定目前条件下适合北京市发展的替代燃料车类型。

2.1 车辆排放削减的费用效果计算方法

本章内容主要是基于美国国家环保局(Environmental Protection Agency, EPA)、美国能源部(Department of Energy, DOE)和加州空气资源局(California Air Resources Board, CARB)等部门发布的各种替代燃料车应用案例报告。分析和比较不同类型和应用领域的替代燃料车案例，首先得到各种类型替代燃料车的排放因子（以 g/km 计），并与同等技术和排放控制水平的汽/柴油车，在相同测试工况下的排放比较，计算出各主要污染物的排放因子削减。各应用案例中的测试都严格按照相应的测试规程和工况进行，得出的实验数据兼顾代表性与全面性。

其次，根据各案例中替代燃料车的单车购买成本、单位里程的车辆维护和燃油费用，结合车辆使用寿命和年均行驶里程，计算单车的年均成本。其中，发动机类型是替代燃料车和传统汽/柴油车在购买成本上产生差异的主要因素，替代燃料车发动机及相关部件应当与其使用的燃料匹配才能使机动车行驶性能和排放控制水平达到最佳状态，而符合要求的特定发动机在生产成本上要高于普通的汽/柴油发动机。车辆维护费用有定期维护检修（包括更换润滑油）和不定期修理的成本和人工费，燃油费用则与不同类型车辆的燃料经济性、单车行驶里程和燃料价格等因素密切相关，两者的加和是车辆的运营费用。为简化起见，车辆购买年均成本与车辆年运营费用加和得到的单车年均成本，这是车辆拥有和使用者非常关心的事情，下文称之为单车成本 1。

由于目前替代燃料的应用范围非常有限，其供应体系远没有汽、柴油完备，所以决策部门在考虑替代燃料车的成本时，需要考虑相关基础设施建设投资及维护费用的增加。例如，对于天然气车辆，这些基础设施主要包括输气管道或气罐运输车、加气站、气体压缩储存设备和管道阀门仪表等配套设施。将此部分成本增加平摊到其服务的一定数量的替代燃料车上，则得到单车基础设施建设的年均成本。由于天然气加气站和液化石油气加气站建成后，部分成本会通过燃料的销售价格与其进价的差额回收，因此，基础设施建设成本计算中应扣除这部分回收的数额。这样得到的基础设施建设和维护成本与车辆初始购买成本相加即为替代燃料车单车基建与购买成本，这是政府管理部门所关心的数据，下文简称为单车成本 2。

分别依据公式(2-1)、(2-2)估算单车成本 1(Cost1)，单车成本 2(Cost2)，单位均以元/车/年。

$$Cost1 = Vehicle / Year + (Maintenance + Fuel) \times Kilometrage \quad (2-1)$$

$$Cost2 = Vehicle / Year + (Station - \Delta Price \times GasAmount) / Number \quad (2-2)$$

其中，Vehicle 为车辆购买成本，单位为元；Year 为车辆使用寿命，单位为年；Maintenance 为单位里程的车辆维护费用，单位为元/千米；Fuel 为单位里程的燃油费用，单位为元/千米；Kilometrage 为车辆年均行驶里程，单位为千米；Station 为基础设施建设投资和维护费用的年均成本，单位为元/年； $\Delta Price$ 为燃料的单位销售价格与进价的差额；GasAmount 为气站年均加气量；Number 为基础设施服务的车辆数。

同时，对同等运营条件下，相似技术水平的汽/柴油车也进行单车成本 1 和单车成本 2 的估算，由于汽/柴油车的燃料供应体系（如加油站等）已经完全是商业化运营，因此在计算单车成本 2 中不再考虑基建成本。(2-2)简化为：

$$Cost2 = Vehicle / Year \quad (2-3)$$

比较替代燃料车和汽/柴油车的成本，得到单车成本增加。

最后，根据以上的结果计算单车的费用效果，它是判断某种类型替代燃料

车所能达到的污染物排放削减经济合理性和优化程度的重要依据。根据车辆年均行驶里程和污染物排放因子削减,可得到单车的污染物年排放削减,将削减与年成本增加相比,即得到污染物削减的费用效果,单位为克/元/车。在制定替代燃料车的发展规划方案时,车辆的费用效果将是最重要的参考依据之一。

车辆排放削减的费用效果 Effect1 和 Effect2 由公式(2-4)、(2-5)计算:

$$Effect1 = Kilometrage \times DecEFi / IncCost1 \quad (2-4)$$

$$Effect2 = Kilometrage \times DecEFi / IncCost2 \quad (2-5)$$

其中, DecEFi 为污染物 i 的单车排放因子削减, IncCost1 为单车成本 1 的增加, IncCost2 为单车成本 2 的增加。

2.2 燃料种类和车型的初步确定

如第一章所述,目前已有的替代燃料车技术非常多,在本研究中不可能对各种燃料在各种车型上的应用都进行费用效果分析。根据技术的成熟度、商业化水平和已有的应用情况等,下面就北京可能应用替代燃料车的三种车型:轻型车、公交车和卡车,分别对比较可行的替代燃料做初步的筛选,以开展进一步的费用效果分析。筛选的主要依据为可获得性、成本、动力性能和续驶里程、安全性及维护要求等。

(1) 轻型车:

轻型车中最主要为轿车,并可进一步分为私家车、单位用车和出租车;另外,轻型车中也包括一定数量的轻型客车和货车。轻型车的主要特点是体积和重量小,快捷灵活,方便舒适。由于大部分车辆为私人购买,在成本上不能很高;由于行驶路线不固定,对动力性能和续驶里程要求较高,如加速快、最高时速至少在 120km/h 以上等;车辆维护和燃料供应也要容易获得,不宜太特殊;此外,还要保证车辆在一定的体积下有足够的有效使用空间。

根据上述要求,首先考虑排除纯电动车。虽然纯电动车的研究已有很长的时间,其动力性能也有了很大的提高,但一次充电的续驶里程仅 60—200km,

是大部分轿车不能接受的；由于电池占了相当的体积和重量，导致纯电动车的有效使用空间明显减少；此外，成本的增加、充电的耗时及充电设备的建设投资等等，都使得纯电动轿车的推广困难重重。目前全世界的主要汽车制造商，只剩下通用汽车公司等为数很少的几家在生产纯电动轿车。前不久，国内新创建的比亚迪汽车公司准备生产纯电动轿车，计划在镍氢电池上有所突破，但到目前为止，还未有这样的新车型面世。

其次是排除二甲醚。到目前为止，二甲醚的生产制造和应用的相关技术还不成熟，离商业化还有相当距离，已有的应用实例也很少，对于主要服务 2008 年北京奥运会的替代燃料车发展规划而言，在对空气质量和能源结构改善没有特别贡献的情况下，应尽量避免应用不成熟的技术，否则，无法预知的问题的出现往往会使预期的效果大打折扣。这不仅对于轻型车，对卡车和公交车也是一样。

费一托法合成燃料的应用，一个重要的途径是煤制甲醇，这里就包括在甲醇燃料车里讨论，而不再单独研究。

此外，北京市目前还没有柴油轿车，轻型客车和货车也以汽油车为主，所以轻型车的讨论中也排除了生物柴油。LNG 目前还未在轿车上有过应用，本研究中不作讨论。

因此，下面将重点研究的轻型车替代燃料确定为 CNG、LPG、甲醇和乙醇，以及混合动力技术。在比较各种替代燃料车时，除了环境影响、成本和使用性能外，燃料经济性也是一个考虑的因素。需要补充的是，应用 CNG 时一般需要较大体积的储气罐，这也会减少轿车的有效使用空间，但正如第一章中提到的，新近推出的一款 Fiat Multipla CNG 轿车将天然气罐设计在底盘位置，不再占用车辆的有效使用空间，这或许是以后天然气轿车的一个发展方向。此外，这几类替代燃料车也有各自的不足之处，但相比前面提到的各类，在北京比较有应用的可能，故作为初步筛选的结果。

（2）公交车：

公交车的行驶路线固定且一般不是很长，在城区的行驶车速较低，对续驶

里程、动力性能和灵活性要求都不高；而其载客量大，年均行驶里程较长，频繁的加减速和怠速工况又导致排放很高，在高人口密度的城区中行驶时对人群的影响很大。此外，由于城市的公交车辆一般只隶属于少数几家公共交通公司，便于管理，因此，替代燃料车的应用一般首先考虑公交车。在调研到的应用案例中，包括了 CNG、LNG、LPG、纯电动、混合动力、燃料电池、甲醇、乙醇和生物柴油，本研究将就上述 9 种燃料和技术进行费用效果的比较和分析。

（3） 卡车：

替代燃料在卡车上的应用不是很广泛，由于长途运输的卡车在燃料供应体系上存在困难，一般是在市政部门下属的环卫车和邮政车上应用替代燃料。已有的应用案例中，替代燃料的种类也很有限，主要为 CNG 和 LNG。另外，对于低硫柴油可能带来的环境效益，也有研究做了评估。考虑到北京市在卡车上应用替代燃料的数量会比较有限，也不是规划的重点，本章将就上述几类燃料进行排放削减的费用效果分析，而不再讨论其它燃料。如有需要，鉴于环卫车、邮政车和公交车的运营特征比较相似，可再参考公交车应用案例的分析。

需要再次强调的是，本研究中除非加以注明，讨论的均为整车厂生产的原装（OEM）车辆，而不是改造车。

2.3 轻型车应用替代燃料的费用效果分析

2.3.1 应用案例简介

（1） 马里兰州 Barwood CNG 出租车案例

CNG 轿车是目前较为成熟的车型。美国能源部在 1997 和 1998 年持续 12 个月的时间对 Barwood 的 CNG 出租车队进行了分析测试，根据测试数据在车辆成本、排放水平、稳定性与可靠性等方面对替代燃料车与传统汽油车进行比较。研究共涉及 10 辆专用 CNG 轻型车和 10 辆加州 2 号清洁汽油车，车辆均为 Crown Victoria 轿车，发动机为 4.6 升 V8。CNG 车压缩比为 10:1，高于汽油车的 9:1，以更好利用 CNG 辛烷值较高的特点获得更高的效率；但 CNG 车等效燃料容量为汽油车的 50%，因此行驶里程和动力性能有所降低。

排放试验选取 7 辆 CNG 车和 7 辆汽油车，根据联邦测试规程(Federal Test

Procedure,FTP-75) 进行, 并对 CNG 车进行了调整蒸发测试以确保没有蒸汽从闭环燃料系统中排出。除了两辆 CNG 车没有进行 120000 英里排放测试外, CNG 车和汽油车均进行行驶里程为 60000、90000 和 120000 英里的 3 轮排放测试, 每辆测试车辆在每一行驶里程均接受 2 次排放检测, 以减小偶然误差。最终实验数据可信度约为 95%。

主要检测的排放污染物包括非甲烷碳氢(NMHC)、总碳氢(THC)、NO_x、CO、CO₂ 和甲烷、甲醛、乙醛等。结果表明, CNG 车和汽油车分别达到美国加州超低排放车(ULEV)标准和美国联邦 Tier 1 排放标准。CNG 车的 NO_x 排放因子与传统汽柴油车相似, 而 CO 和 CO₂ 则有较大程度的降低; 因以天然气作为燃料, 其总碳氢(THC)排放约为传统汽柴油车的 200%~300%, 但其中非甲烷碳氢(NMHC)则有 66% 的降低。

(2) 科罗拉多州 Denver CNG 小型公交车案例

SuperShuttle 公司在 Denver 市用小型客车从城区运送乘客往返机场, 车队的 85 辆小型客车中共有 18 辆车使用 LNG 和 CNG。参加本次研究的有 13 辆车, 其中 5 辆专用 CNG 小客车的排放达到加州超超低排放车 (SULEV) 标准、EPA 的 ULEV 和天然低排放车 (Inherently Low Emission Vehicle, ILEV) 标准, 5 辆双燃料小客车在使用 CNG 时排放达到 EPA 的 ULEV 标准, 使用汽油时达到 Tier 1 标准, 还有 3 辆汽油车的排放达到 Tier 1 标准。车辆的行驶路线包括市区道路和高速路; 研究的评估期为一年。

这些车辆都是 1999 年 E350 Ford 客车, 发动机为 5.4 升 V8。专用 CNG 车、双燃料车和汽油车的压缩比均为 9:1。对 13 辆车的测试共进行了三轮, 遵循冷启动的 FTP-75 规程, 分别安排在车辆行驶里程为 10000、40000 和 60000 英里的时候, 在第二轮测试中, 还增加了 US06 测试循环 (US06 和 SC03 都是从 2000 年开始, FTP 增补规程中要求的内容, US06 反映了高速/高加速和速度的快速波动, SC03 则反映了使用空调、启动后立即驾驶和微瞬态驾驶的状态)。此外, 这些车辆还进行了密闭室蒸发测试 (SHED), 以确定蒸发排放。

测试用的普通汽油雷氏蒸气压为 8.9psi, 硫含量为 328ppm; CNG 燃料的甲烷含量为 91.7%, 乙烷含量为 4.46%。在进行低温 CO 测试时, 使用了雷氏蒸气

压更高的汽油。

具体的测试结果如下表所示：

表 2-1 SuperShuttle CNG 小客车与汽油车排放因子比较

污染物	测试里程 （英里）	平均结果		不同燃料污染物 排放差异(%)
		CNG 燃料	RFA 汽油燃料	
常规污染物排放(g/mile)				
NMHC	1-10000	0.012	0.298	-96.0
	2-40000	0.022	0.280	-92.1
	3-60000	0.017	0.390	-95.6
CO	1-10000	0.365	6.140	-94.1
	2-40000	0.338	5.873	-94.3
	3-60000	0.500	9.067	-94.5
NOx	1-10000	0.055	1.443	-96.2
	2-40000	0.560	1.903	-70.6
	3-60000	0.490	2.763	-82.3
THC	1-10000	0.115	0.357	-67.8
	2-40000	0.275	0.333	-17.5
	3-60000	0.318	0.460	-31.0
温室气体排放(g/mile)				
CO ₂	1-10000	575.9	747.7	-23.0
	2-40000	555.7	743.0	-25.2
	3-60000	562.8	720.6	-21.9
CH ₄	1-10000	0.103	0.063	61.8
	2-40000	0.253	0.053	373.4
	3-60000	0.303	0.067	353.8
燃料经济性(mile/gallon)				
燃油经济性	1-10000	11.15	11.82	-5.7
	2-40000	11.55	11.9	-3.0
	3-60000	11.77	12.18	-3.3

比较结果可以得到，单一 CNG 燃料车 NMHC 和 CO 排放削减都在 90%以上，而 NO_x 排放随着行驶里程的变化也有 70%~96%的削减。所有污染物的排放
在任何行驶里程下测试结果都满足超低排放车标准。

这种 CNG 小客车较同类汽油车的车辆成本增加大约 2000 美元，其车辆运营费用比较结果如表 2-2 中所示：

表 2-2 SuperShuttle CNG 小客车与汽油车运营费用比较

	CNG 专用车	汽油车
平均燃料费用 (RMB/km)	0.505	0.563
平均维护费用 (RMB/km)	0.149	0.144
平均运营费用 (RMB/km)	0.655	0.707

可以看出，专用 CNG 小客车的维护费用和同类汽油车相差很小，燃料费用还略低于汽油车（CNG 小客车的燃料经济性略低，但由于气价也较低，相乘以后燃料费用要低于汽油车），总的运营费用较低。

（3）德克萨斯州 LPG—汽油双燃料轻型卡车案例

基于有原始设备制造商（OEM）生产的车辆，以及 LPG 燃料供应的基础设施，德州交通部在其车队中添置了 400 辆 LPG—汽油双燃料轻型卡车，它们通常只用来进行短途运输，年均行驶里程在 15000-20000 英里。研究中收集了 18 个月的运营、维护和费用数据，有 31 辆 Ford F-150 双燃料车和 4 辆 Ford F-150 汽油车参与了评估。Ford F-150 轻型卡车是 1996 年生产的，发动机为 4.9 升 I-6，145 马力，双燃料车的燃料储罐容积为 48 加仑 LPG+18.2 加仑汽油，汽油车的双油箱容积为 18.2 加仑+19 加仑，压缩比均为 8.8:1。在评估的过程中，双燃料车平均使用了 78% 的 LPG（体积比），没有车辆完全使用 LPG。双燃料车使用 LPG 的燃料经济性平均为 10.1MPG（英里/加仑，相当于 12.7 英里/等量加仑汽油），略低于汽油车的 13.2MPG。原案例中没有对车辆排放进行测试，本章中采用了美国能源部对 Ford F-250 轻型卡车的测试数据（测试报告中的车辆配置和上面的 F-150 非常一致）。

（4）香港 LPG 出租车研究

该研究并非香港应用 LPG 出租车的实际评估，而是香港立法委秘书处为香港实施 LPG 出租车计划而准备的一份调研报告，其中对 LPG 轿车和汽/柴油车（国内的出租车基本是汽油轿车，而香港则是柴油轿车）在污染物排放、效率、性能和安全性、车辆成本、维护和燃料费用等方面做了详实的比较，并提出了政府可以采取的经济或非经济措施，鼓励民众使用 LPG，以及提高燃料使用的安全性。该报告综合了欧洲（主要有荷兰 TNO 道路车辆研究所的排放测试）、日本、美国和加拿大等国的众多研究结果，对评估 LPG 出租车的费用效果很有参考价值。

（5）加州 Hertz M85 灵活燃料车案例

加州的低排放车项目促使位于 Los Angeles 地区的 Hertz 轿车租赁公司引入了替代燃料车，从 1993 到 1996 年，他们共购入 1913 辆灵活燃料车，其中 1563 辆为 Ford Taurus，350 辆为 Dodge Interpid。1995 年 Dodge Interpid 轿车使用 3.3 升 V6 发动机，装有电控多点燃料喷射系统和三元催化转化器。研究中对使用 M85（85%甲醇+15%无铅汽油）的 Dodge Interpid 灵活燃料车共进行了两轮、44 次测试，同时，对相似技术的 Dodge Interpid 汽油轿车进行了两轮、55 次的测试以作为对比；测试均采用 FTP 规程。

（6）俄亥俄州 E85 灵活燃料车案例

乙醇汽车的数量近年来在美国一直保持上升趋势，这和甲醇汽车正好相反，应用较多的地区有加州、伊利诺斯州、印第安纳州、肯塔基州、密歇根州、明尼苏达州、密苏里州、俄亥俄州、德克萨斯州和威斯康星州，其中如俄亥俄州使用乙醇和汽油的灵活燃料轻型车。美国能源部用 2 年时间对使用 E85（85%乙醇+15%无铅汽油）的灵活燃料车和使用加州 2 号清洁汽油（含氧量 2.1%）的同类汽油车在排放水平上进行了测试比较。测试的两辆 FFV 为 1996 年 Ford Taurus 车型，3.0 升 V6 发动机，压缩比 9:1；因汽油比乙醇有更高的能量密度，因此测试的两辆汽油车油箱体积有所减小。

测试规程采用 FTP 规程，每辆车均重复测试以降低偶然误差。从结果上看，由于该案例更多从能源战略考虑，并且汽油轿车的排放控制已达到较高水平，因此 FFV 的主要污染物排放，如 NO_x 和 CO 和汽油车很接近，甚至有所增加。

本案例中灵活燃料车的单车购买成本较汽油车增加约 1000 美元，车辆维护费用比汽油车略有降低。由于使用了一个现成的临时加油站，基础设施的成本没有增加。而一般情况下，服务 80—160 辆公交车（估计从燃料消耗上相当于 300—600 辆轻型车）的乙醇供应站，比柴油站的基础建设投资高\$50000—\$100000，操作费用差不多。

（7）混合动力轿车

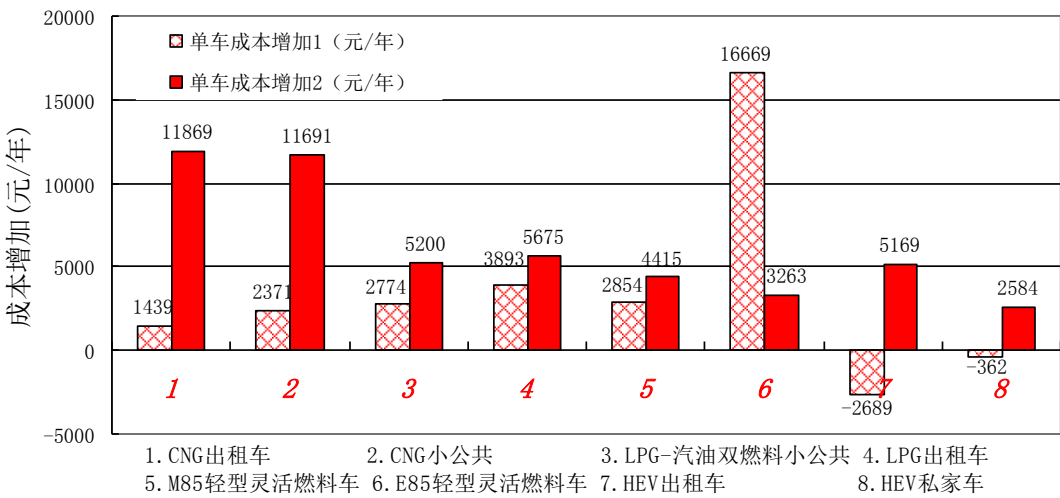
混合动力轿车在近几年出现了飞速的发展，由于混合动力技术本身在基础设施要求、排放削减和燃料经济性等方面所具有的优势，随着技术的日趋成熟和成本的不断降低，其商业化过程非常快。丰田和本田公司生产的三款混合动力轿车在美国市场的销售量逐年攀升，2004 年丰田 Prius 轿车的推荐零售价格仅为 20,510 美元，本田 Civic 和 Insight 轿车的推荐零售价格则分别仅为 19,650 美元和 19,180 美元（王全录，2003）。

在排放削减和燃料经济性上，混合动力轿车都有显著的提高。根据美国 EPA 的测试结果（FTP 工况），Prius 轿车的 NOx 排放因子仅为 0.009g/mile，达到了加州的超低排放车标准（SULEV，0.02g/mile）和联邦的第二阶段标准（TIER2，0.07g/mile）。而参考 EPA 的绿色汽车指南，Civic 和 Insight 轿车的排放稍高于 Prius 轿车，在排放等级上要低 1~3 级（EPA，2003）。Insight、Prius 和 Civic 轿车的燃料经济性在城市工况下分别达到 60MPG（3.9L/100km）、60MPG 和 45MPG，在高速工况下则分别为 66MPG（3.6L/100km）、51MPG（4.6L/100km）和 51MPG，有意思的是，Prius 轿车在城市工况下的燃料经济性反而高于高速工况，这在以单一内燃机为动力的汽车上是从未有过的。

2.3.2 费用效果分析

根据目前国内轻型车的情况，使用替代燃料的轻型车全部是与相似技术和排放控制水平的汽油车进行比较。

根据公式（2-1）、（2-2）、（2-3）计算得到的单车成本增加如图 2-1 所



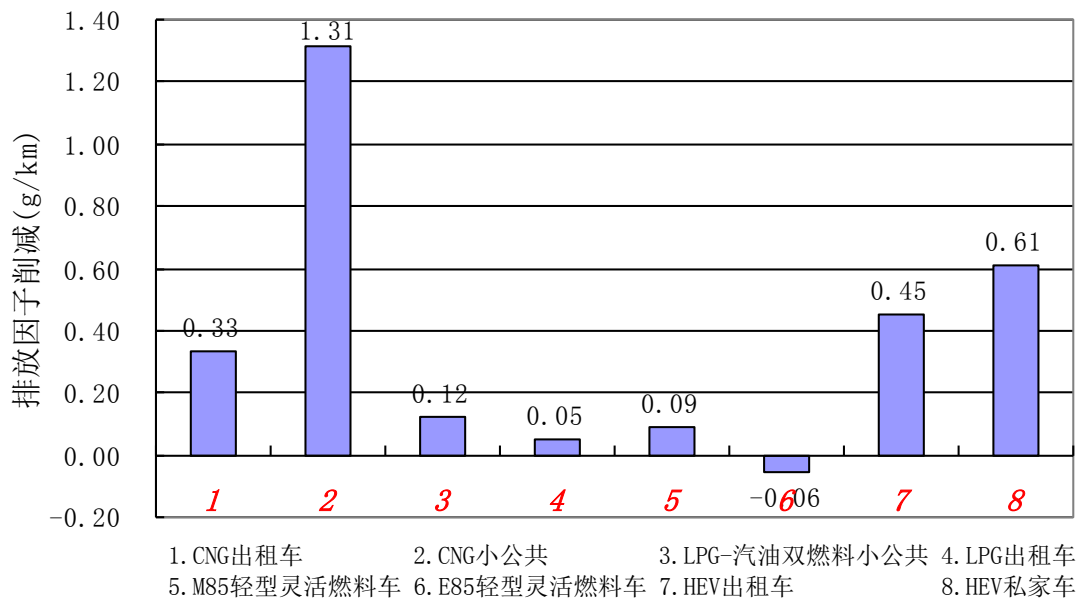
示。

图 2-1 替代燃料轻型车年均成本增加比较

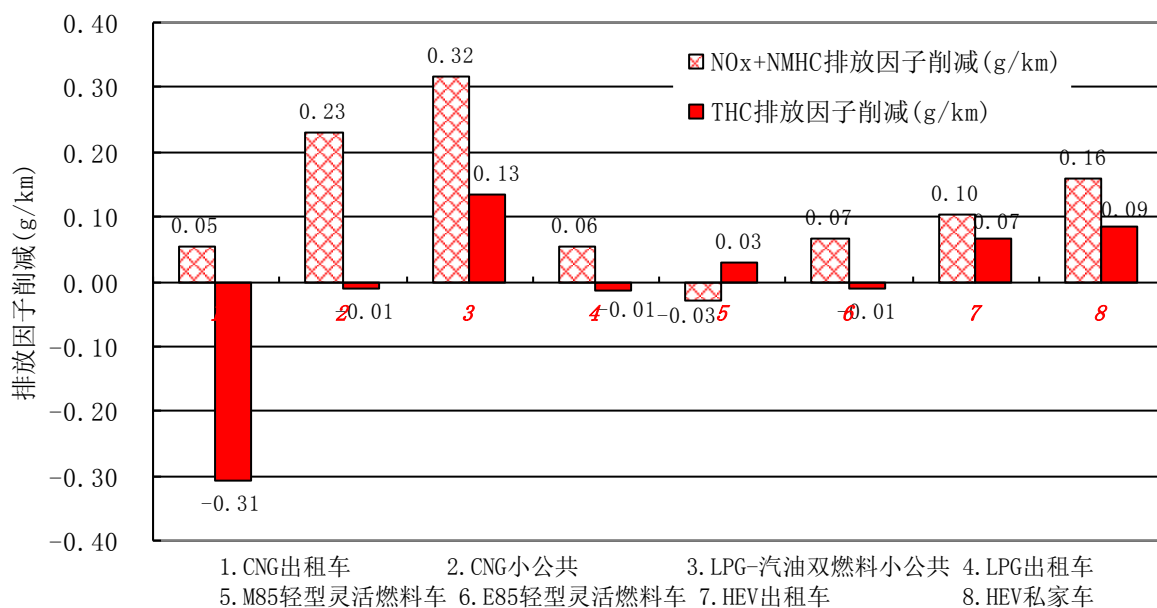
从图上可以看到，在 8 种替代燃料车中，混合动力轿车的年均成本增加 1 为负值，即年均成本减少；使用乙醇（E85）的灵活燃料车成本增加最高，超过 16000 元/年。基础设施费用对各车型成本增加的影响也相差较大，CNG 出租车和小公共的成本增加 2 都大于 11000 元/年，这主要是由于天然气加气站建设配套设施复杂，相关要求和标准较高，受各种因素局限大，建设和维护的费用都很高。

结果中最令人感兴趣的，是混合动力出租车的年均成本减少。分析其原因，虽然混和动力轿车的购买成本要高于汽油车（约多出 2500 美元），但它的燃料经济性比汽油车提高很多，特别是针对城市里怠速、加减速出现频繁的行驶工况，混合动力车更显示出优越性。在都使用汽油的情况下，混合动力出租车单位行驶里程的燃油费用大大降低，虽然维护费用要高于汽油车，但其单车成本 1 比同类汽油车仍然降低了约 2700 元/年，混合动力轿车的单车成本 1 也降低了 360 元/年。这是相当吸引人的结论，如果克服了公众对混合动力轿车认识不足而带来的不必要顾虑（例如对新车型不了解而带来的操作困难等问题，这些可以通过加强宣传力度和售后服务解决），推广混合动力轿车将是非常有前景的。

图 2—2 给出了使用各种替代燃料的轻型车和同类汽油车比较，常规污染物的排放因子削减。



(a) CO 排放因子



(b) NO_x+NMHC 和 THC 排放因子

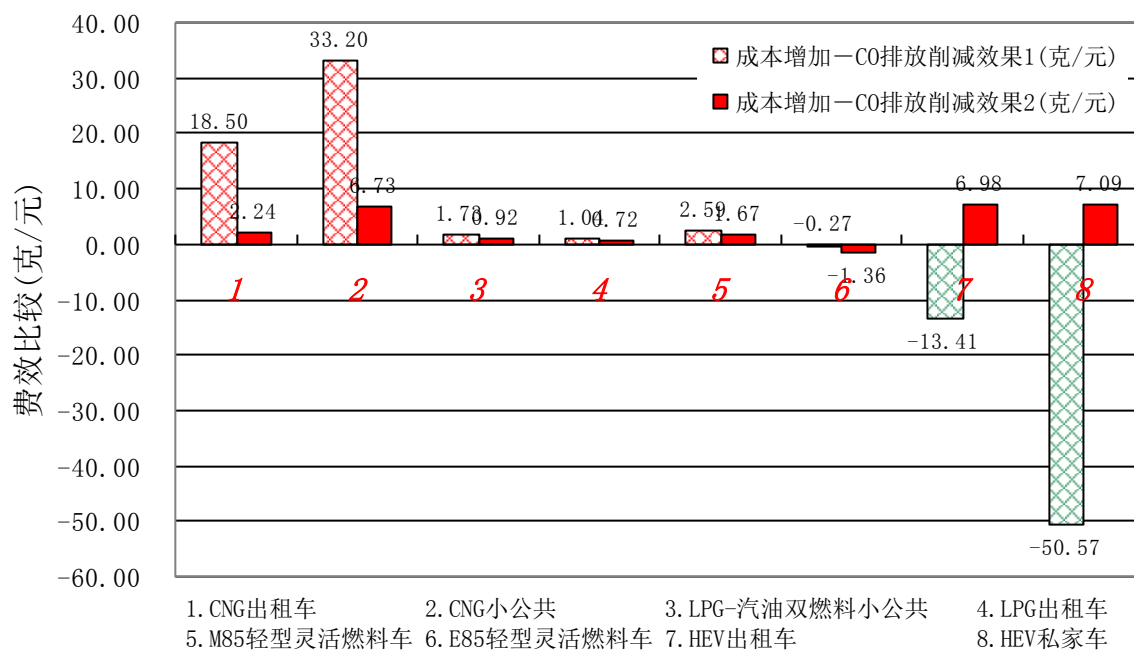
图 2-2 替代燃料轻型车排放因子削减比较

注：（1）替代燃料轿车的比较基准为同类轻型汽油轿车（LDGV），CNG 小公共和 LPG—汽油双燃料小公共的比较基准为同类轻型汽油卡车 2（LDGT2）；

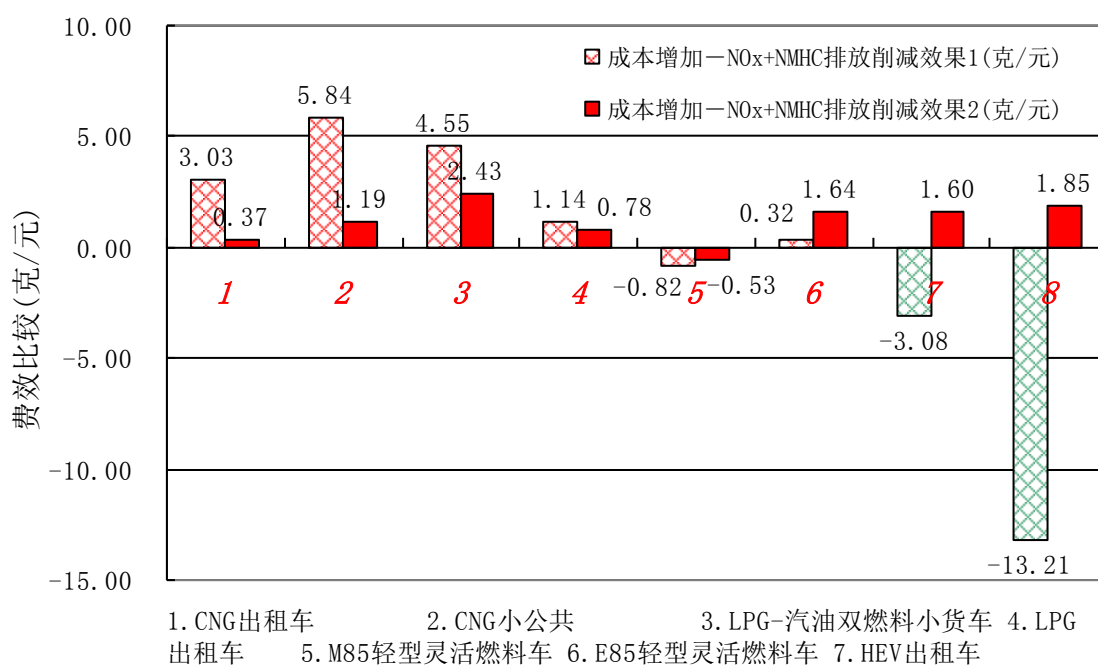
（2）由于可获得的测试数据有限，LPG 出租车的 NO_x+NMHC 排放因子削减实际为 NO_x+THC 排放，LPG—汽油双燃料小货车的 THC 排放因子削减实际为 NMHC 排放。

CNG 车和混合动力车的 CO 排放都比同类汽油车有明显降低，而 LPG 车（包括双燃料车）、甲醇和乙醇灵活燃料车的 CO 排放削减都不明显，甚至乙醇车还略有增加。NO_x+NMHC 的排放则有不同，替代燃料小公共的排放削减都比较明显，轿车中以混合动力轿车的减排效果最好，其它车辆的排放因子削减都不超过 0.10g/km。在 THC 的排放上，各种替代燃料车都没有太大的优势，CNG 出租车因为甲烷排放较高，THC 排放的增加比较明显。

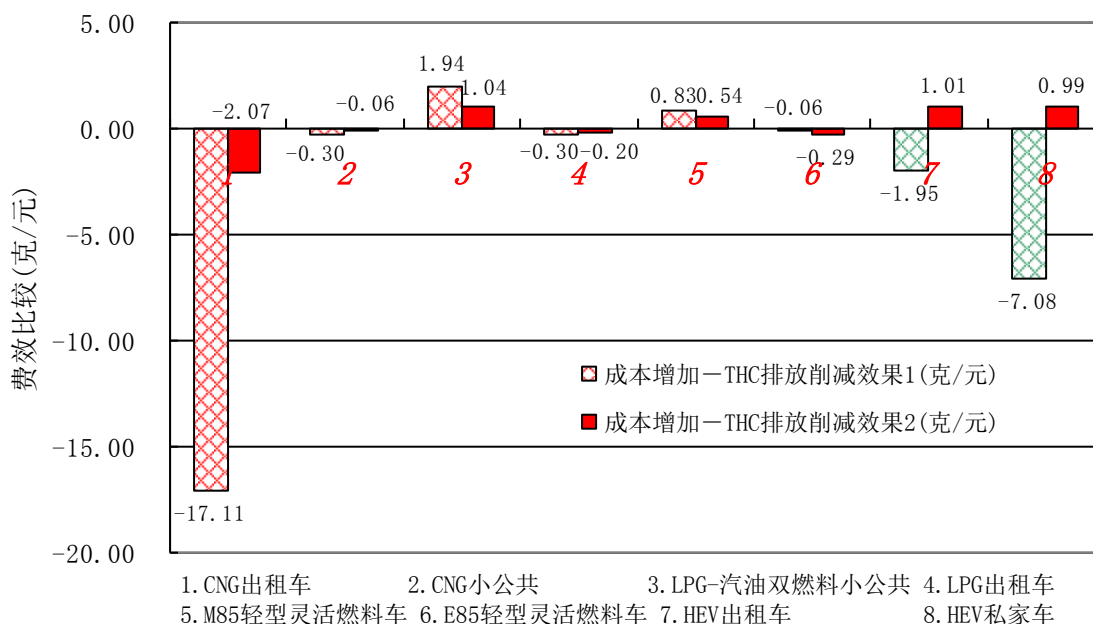
根据单车排放因子削减和年均成本增加的数据，计算得到各种替代燃料轻型车的费用效果，如图 2-3 所示。



(a) CO 排放削减的费用效果



(b) NO_x+NMHC 排放削减的费用效果



(c) THC 排放削减的费用效果

图 2-3 替代燃料轻型车的费用效果比较

注：由于可获得的数据有限，LPG—汽油双燃料小货车的 THC 排放削减的费用效果实际为 NMHC 的费用效果，LPG 出租车的 NO_x+NMHC 排放削减的费用效果实际为 NO_x+THC 的费用效果。

上图中 HEV 轿车排放削减的费用效果用绿色表示，是因为其成本增加为负值，这和其它替代燃料车的费用效果是不能直接比较的，所以在颜色上加以区分。不难看出，混合动力轿车的费用效果是最优的。

比较其他 6 种替代燃料轻型车，可以发现，CNG 小公共的费用效果较好，另外还有 CNG 出租车和汽油—LPG 双燃料小公共，其它车型差别不大。由于数据有限，这里没有比较分析各类车的毒性物质排放，但就从有毒的甲醇和甲醛排放而言，甲醇车负效应更大。

综上所述，在目前比较可行的应用中，混合动力轿车的费用效果最好，其次是 CNG 和 LPG 轻型车（包括专用车和双燃料车），醇类车在排放削减的效果上不明显，甲醇车还存在有毒物质排放的问题。由于轻型汽油车相比于其他车型，发动机和排放控制技术、油品质量等均提高很快，其污染物排放会大幅降低，未来应用替代燃料车对污染物排放的削减效果不会非常显著。特别是国内

目前最关心的 PM 排放，由于汽油车本身 PM 排放很低，预测的 2008 年北京市轻型汽油车 PM 平均排放因子只有 0.009~0.022 g/km，已没有多少的削减余地。CNG 和 LPG 轿车的排放因子差不多在 0.01 g/km 的水平，相差很小（差距在测量误差的范围之内），混合动力车也最多对 PM 排放因子削减几个 mg/km，因此这里对替代燃料轻型车的 PM 排放削减效果不做评估。但另一方面，由于轻型车保有量在各类车中最大，在该领域发展替代燃料车，对于调整能源结构和一定程度上降低污染物排放仍具有十分重要的意义，首选车型为技术趋近成熟、燃料供应充足且价格适中的混合动力轿车。

2.4 公交车案例费效分析

如前所述，应用于公交车领域的替代燃料种类最多，下面将就包括 CNG、LNG、LPG、电力、醇类和生物柴油在内的 9 种燃料进行讨论。

2.4.1 应用案例简介

（1）华盛顿州 Pierce Transit CNG 公交车案例

Pierce Transit 公司的车队在华盛顿州塔科马地区（Tacoma）拥有 190 余辆公交车，服务约 450 平方英里的地区和 60 万人口。公司从 1986 年就开始引入替代燃料，曾将两辆公交车改装成 CNG—柴油混合燃料车，这个尝试取得了一定的成功，但燃烧效率是个问题，从事后的经验来看，无论是选择哪一种燃料或是混合燃料，都无法使发动机达到最大效率。这个初步尝试令公司在 1987 年做出决定，购置专用 CNG 公交车。Pierce Transit 公司找到了原始设备制造商—Cummins 发动机公司，从 1989 年—1998 年间，共购入 72 辆专用 CNG 公交车，其中 30 辆使用 Cummins L10-240G 天然气发动机，27 辆使用 L10-260G 发动机，15 辆使用 L10-280G 发动机。在此之前，公司已购置 19 辆 CNG—汽油双燃料大客车。而从 1998 年秋天开始，Pierce Transit 公司还将购入 45 辆低底板 CNG 公交车。

在 1990 年代中期，Pierce 公司和美国能源部一起对该车队的运营成本和排放情况进行了评估研究。接受测试的专用 CNG 公交车包括了上述 Cummins 公司的 L10 系列三种发动机；作为对比的同类柴油车使用 Cummins L10 柴油发动机。由于压缩比低、存在截留损耗和燃料储罐增重，CNG 公交车的燃料效率较柴

油车有 20% 的降低。

台架排放测试采用 CBD 驾驶循环，由西弗吉尼亚大学完成。下表列出了塔科马地区使用 Cummins L10-260 发动机的专用 CNG 公交车（装备尾气催化转化装置）与同类柴油车主要污染物排放因子的比较结果。

表 2-3 Pierce Transit CNG 公交车与柴油车排放因子比较（单位：g/mile）

	NO _x	CO	CO ₂	THC	PM
CNG 公交车	11.2	0.74	2828	15.5	0.016
柴油公交车	24.3	10.95	2554	2.4	1.76

由此可见，CNG 公交车的 NO_x、CO 和 PM 排放因子比同类柴油车分别下降 55%、98% 和 99%，THC 排放有较大增加，但其中超过 90% 为非活性的甲烷。

上述 CNG 公交车较同类柴油车的单车购买成本增加约 \$30000~\$50000，而两者的车辆维护费用差别很小，CNG 公交车的单位里程燃油费用比柴油车约高出 20%。车队的 CNG 加气站于 1992 年建成，当时耗资 \$847000；随后进行了附加设备的建设，增加投资 \$500000。

（2）DART's LNG 公交车案例

达拉斯地区快速运输公司（Dallas Area Rapid Transit, DART）的车队拥有 1000 辆公交车，其中 139 辆为 LNG 公交车。美国能源部对其中的 15 辆 LNG 车和 5 辆柴油车进行了 12 个月的评估，总体结论是 LNG 公交车的 NO_x 和 PM 排放比同类柴油车低，但燃油经济性下降，单位行驶里程的燃料费用和车辆维护费用都有增加。

接受测试的 LNG 车和柴油车发动机型号分别为 Cummins L10-280G 和 Cummins M11-280，均装备尾气催化转化设备。排放测试采用 CBD 驾驶循环，具体结果如下表所示：

表 2-4 DART's LNG 车与柴油车排放因子比较（单位：g/mile）

	NO _x	CO	CO ₂	NMHC	PM
--	-----------------	----	-----------------	------	----

LNG	21.2	0.23	2236	0.05	-
柴油	25.5	4.44	2639	1.16	0.322

案例中的 LNG 公交车比同类柴油车的单车购买成本增加约 40000 美元，单位里程的燃油费用高出 75%，但维护费用降低 17%，加和后的运营费用，LNG 公交车和柴油车分别约为 4.0RMB/km 和 3.0RMB/km。

该车队在 1998 年和 1999 年分别建设了一座 LNG 加气站，每座加气站按夜间服务 210 辆公交车设计，由 2 个 30000 加仑体积燃料箱、3 座 60 加仑/分钟的气泵和 LNG 分配泵以及相关配套设施构成。两座气站的建设和维护费用为 750 万美元。输送 LNG 的管口有时因发生泄漏而需要重建，增加了维护费用。

(3) LPG 公交车研究

对 LPG 公交车的费用效果研究没有专门的案例，这里参考了几份相关报告，包括 DOE NREL 发布的替代燃料运输公交车评估项目最终报告、香港立法委秘书处的 LPG 车用燃料研究报告、德克萨斯州 LPG—汽油双燃料小货车研究报告等。在单车成本增加上主要涉及以下参数的确定：

- 车辆购买成本：报告中给出 LPG 公交车比同类柴油车增加 4 万美元，但由于中国的人工费低，生产成本下降，参考其它几类替代燃料车的成本增加，取 LPG 公交车的购买成本增加 2 万美元；
- 车辆维护费用：LPG 车更换润滑油的周期比同类柴油车长，发动机的清理工作也有所减轻，但由于驾驶员对燃料和发动机性能不熟而可能导致不定期维护的费用增加，综合起来，可认为 LPG 公交车的维护费用比同类柴油车稍有降低（5~10%）；
- 燃料费用：技术成熟的 LPG 发动机燃烧效率和汽油机基本相同，比柴油车约低 20%，根据目前北京的 LPG 和柴油价格，计算得到 LPG 公交车的单位里程燃料费用比同类柴油车高约 30%；
- 基础设施费用：和 LPG 轻型车相同，唯一的区别是服务的车辆数有所减少。

LPG 公交车的排放因子根据已知的 CNG 公交车排放，参考特定发动机的排

放参数和相应的排放标准限值，经估算得到，具体可参考第三章相关内容。

（4）田纳西州 Chattanooga 纯电动公交车案例

Chattanooga 市是一座工业城市，市中心的交通堵塞非常严重。为了解决这个问题，交通管理部门希望减少私家车进城，而鼓励公共交通。他们认为如果公交车非常独特，市民们就愿意选择使用，因此最终选择了纯电动车。在该市的 81 辆公交车中，有 16 辆电动车。

纯电动公交车的长度为 6.7 米和 9.4 米，运营路线长 5.6km，每年运载 60～75 万乘客。车辆的最高时速为 64km/h，已经足够。车上安装了可再生刹车系统，利用行驶车辆的动能来给电池充电。旧的电动车使用直流电推进系统，比较便宜，控制装置也简单；新车则使用小而轻的交流电系统，动力性能更好，将电能转化成机械能的效率更高。交流电系统比直流电系统少耗用 30% 的电力，重量约轻 40%，但续驶里程稍短。

6.7 米和 9.4 米的电动公交车购买成本分别是 16 万和 18 万美元。车辆的燃料经济性平均为 1.8kWh/mile，在目前电价的情况下，燃料费用比同类柴油车低 7%。电动车由于不需要调整发动机或更换润滑油，因此维护费用只有柴油车的 1/3 不到。由于缺乏充电站的建设和维护费用数据，暂不考虑这部分的投资。

纯电动公交车可认为是零排放车，而作为对比，取 NYCT 混合动力车案例中的柴油车排放进行参考。

（5）加州 Santa Barbara 纯电动车案例

Santa Barbara 大都会运输区（MTD）在 1991 年就购置了电动公交车，以提供无气味、安静和清洁的服务。到 1996 年，车队拥有 12 辆电动车，另外还有 6 辆车正在成产，车辆类型为 6.7 米的敞棚车和 10.7 米的重型车。

敞篷车可以不用再充电而载重运营八小时，一天最多行驶 130km。车上也安装了可再生刹车系统，该系统使车辆的续驶里程延长了 17%，也使电池的寿命变为原来的三倍。车内的加热和制冷系统需要用化石燃料设备，因为电动气温调节装置在价格上不具备竞争性。如果使用一个 7kW 的 LPG 辅助发电机，可是续驶里程延长 50%，但这样纯电动车就变成了混合动力车，并有气味、噪声

和污染物排放。新的电动车为提高储能和车重比，常采用纤维合成车身设计。

电池的能量储存能力不及石油燃料，但电力推进系统在能量转化上的高效率部分弥补了这个不足。9.1 米长的电动公交车，可以减少车辆的耗能达 70%，单车的能量效率为 60~80%。尽管如此，由于电池故障、用能过度、充电不足或低温操作等原因，有时仍会导致车辆没有足够的储能完成行程。电动公交车在路上的检修次数是同类柴油车的二倍，这大大增加了车辆维护费用，使得电动车的单位里程维护费用比柴油车高出 10%。在单位里程的燃料费用上，由于电价的原因，电动公交车比同类柴油车也高出 6%。

不考虑发电厂的污染排放，估计电动公交车本身在 NO_x、活性有机气体、CO 和 PM 排放上有 95%的削减。

(6) NYCT 混合动力车案例

纽约城市运输公司(New York City Transit, NYCT)于 1998 年开始使用 10 辆柴油混合动力公交车(Orion VI)。该车长 12.2 米，是美国在用的型号最大的混合动力公交车。1999~2001 年期间 DOE NREL 对车队中的 9 辆 Orion VI 混合动力公交车(4 辆旧车，5 辆新车)和 14 辆 Orion 柴油车进行了研究。评估结果表明，混合动力车在燃料经济性和排放水平上都明显优于柴油车，但是车辆成本和维护费用也高很多。

混合动力车和柴油车的发动机型号分别为 Navistar DDC S30 和 DDC S50，马力分别为 230bhp@2300rpm 和 270bhp，压缩比分别为 17.5:1 和 15.0:1，储油容量分别为 100 加仑和 150 加仑柴油。此外，混合动力车装备有功率为 170kW@2000rpm 的发电机和 46 组提供 580 伏特电压的铅酸电池，每组电池容量 64A-hrs。实际运行过程中，混合动力车的燃料经济性比两组柴油车分别高出 10%和 17%。西弗吉利亚大学采用 CBD 循环测试的结果表明，混合动力车在使用可再生刹车系统时燃油经济性比同类柴油车高 23%，不使用时则高出 6%。

排放测试分别采用 CBD 循环和 NY BUS 循环进行，后者更加严格、平均车速低，测试结果一般明显高于其它驾驶循环。接受测试的混合动力车装备了催化柴油颗粒物过滤器(Diesel Particulate Filter, DPF)，而柴油车则装有标准催

化转化设备。测试结果如表 2—5 所示：

表 2-5 NYCT 混合动力车与柴油车排放因子比较

测试 规程	公交车辆	CO	NO _x	HC	PM	CO ₂	经济性
		g/mile	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile	mile/gallon
CBD	Orion 混合动力车	0.1	19.2	0.08	0.12	2262	4.3
	Orion 柴油车	3.0	30.1	0.14	0.24	2779	3.5
	混合动力车/柴油车	-97%	-36%	-43%	-50%	-19%	+23%
NY Bus	Orion 混合动力车	5.0	40.5	1.13	0.16	4251	2.3
	Orion 柴油车	11.3	72.0	0.60	0.70	7076	1.4
	混合动力车/柴油车	-56%	-44%	+88%	-77%	-40%	+64%

可以看到，除了NY BUS循环下HC排放以外，混合动力车各常规污染物排放较柴油车有明显削减，而燃料经济性显著提高。

尽管混合动力车的优点十分突出，但要大范围推广成为市场上的主流车型，仍然困难重重。除了发电机和电池技术本身还有待改进和完善之外，车辆成本和维护费用高也是十分重要的原因。该案例中的混合动力车单车购买成本较同类柴油车增加了 17.5 万美元，进行费用效果计算时考虑国内自行研制的成本降低，取为 10 万美元；车辆运营费用如下表所示：

表 2-6 混合动力车与柴油车运营费用比较

	混合动力车	柴油车
平均燃油费用（RMB/km）	0.600	0.720
平均维护费用（RMB/km）	2.660	1.266
平均运营费用（RMB/km）	3.260	1.986

混和动力车维护费用明显高于柴油车，其主要原因有：

- 混合动力车技术尚不成熟；
- 维修的机械师对混合动力技术不熟悉，需要更多的时间进行问题诊断，更换配件也需要较长的等待时间；
- 在整个服务的车队中，混合动力车只是很小的一部分，这也提高了平均成本。

NYCT 已分别为 2002 年和 2003 年订购了 125 辆和 200 辆性能更高的混和动力公交车（Orion VII），进一步还可能再预定 50 辆。这样，到 2006 年，NYCT 的车队将拥有 646 辆 CNG 公交车和 385 辆柴油混和动力公交车。

（7）燃料电池公交车研究

和 LPG 公交车的研究一样，燃料电池车也没有专门的费用效果评估案例。本研究参考了刚刚出现的个别应用，如美国能源部和加州 SunLine 运输公司等正在 Thousand Palms 进行的燃料电池公交车示范项目。该车辆使用的 XCELLSiS Phase 4 燃料电池发动机，由 DaimlerChrysler、Ford 汽车公司和 Ballard 电力系统共同拥有，它致力于开发、生产交通用的燃料电池发动机并使其商业化。Phase 3 燃料电池公交车已在伊利诺斯州 Chicago 市和加拿大 Vancouver 市进行了两年的示范运营，取得了一定的成功，Phase 4 燃料电池公交车的设计上有了如下的改进：

- 发动机体积减小了 50%；
- 车重减轻了 1500 多 kg；
- 燃料电池组由 20 个减为 8 个；
- 电动机数量由 12 个减为 1 个；
- 启动时间由 45 秒减为 3 秒；
- 维护费用降低（可能是 P3 公交车的 90%）

在 13 个月的 Ballard 燃料电池公交车示范项目中，车辆共行驶了 14400km，燃料经济性达到 8.9MPG（英里/当量加仑汽油），是 CNG 公交车的 2 倍多。但由于氢气的价格也至少是 CNG 的两倍，故单位里程的燃料费用和 CNG 公交车差不多甚至更高。车辆的购买成本仍极昂贵，达到 310 万美元，另加 40 万美元的额外保险，在本研究中考考虑国内自行研制燃料电池车，车辆成本取为 500 万元。车辆的维护费用取为和 NYCT 混合动力车相同，根据目前的情况，这个估计只会偏低而不会高。

燃料电池车属于零排放车，除 CO₂ 外，常规污染物 HC、CO、NO_x 和 PM 等排放都为零。

除使用氢燃料的燃料电池车外，SunLine 公司还进行了两辆 Hythane 燃料公交车的示范运营。Hythane 是由 20%氢气+80%天然气（体积比）组成的混合燃

料，使用这种燃料时 NO_x 排放比使用 CNG 还要低 40%。Hythane 可作为在交通部门逐渐引入氢燃料的一个过渡措施。

（8）醇类燃料公交车研究

甲醇/乙醇燃料在公交车领域的应用，一般比在轻型车（多为灵活燃料车）上纯度更高，如纯甲醇燃料车和 E95（95%乙醇+5%无铅汽油）。美国能源部在不同地区和城市对这两种公交车型的进行了研究测试，并选取 17 辆柴油车（其中 8 辆装有颗粒物捕集装置）作参照。

测试中醇类燃料车均采用 Detroit Diesel Corporation（DDC） 6V92TA 发动机，压缩比为 20:1，而柴油车则采用 DDC Series 50 发动机。排放测试采用 CBD 驾驶循环，具体数据如下表所示：

表 2-7 M100/E95 公交车与柴油车排放因子比较

燃料	城市	颗粒物捕集器	车辆数量	测试次数	里程（mile）		排放（g/mile）			
					最小值	最大值	PM	NO _x	HC	CO
乙醇	Peoria	-	5	8	60000	104000	0.63	13.4	8.9	37.1
	Minnesota	-	5	8	28000	43000	0.49	22.0	15.4	41.9
甲醇	Miami	-	5	9	38000	87000	0.39	11.6	37.5	25.1
	New York	-	5	10	6700	42000	0.11	6.8	2.1	8.4
柴油	Peoria	无	3	6	89000	108000	0.72	25.3	2.7	7.5
		有	3	3	58000	69000	0.44	-	-	-
	Minnesota	无	5	9	107000	151000	1.05	25.3	3.4	9.5
		无	5	10	43000	69000	0.81	26.4	2.1	6.7
		有	5	5	26000	41000	0.34	-	-	-
	Miami	无	4	6	18100	256000	2.53	26.7	2.1	16.0

可见，甲醇车和乙醇车相比没有颗粒物捕集器的柴油车，NO_x 和 PM 排放有一定程度的削减，但相比安装颗粒物捕集器的柴油车，PM 排放的削减已不很明显。在 HC 和 CO 的排放方面，使用醇类燃料都有增加。

目前在用的甲醇/乙醇公交车较同类柴油车的单车购买成本增加约 2 万美元，车辆运营费用见表 2-8：

表 2-8 M100/E95 公交车和柴油车运营费用比较

	M100 公交车	E95 公交车	柴油车
平均燃油费用 (RMB/km)	0.939	1.664	0.720
平均维护费用 (RMB/km)	1.687	1.217	1.163
平均运营费用 (RMB/km)	2.626	2.881	1.883

由上表可以看到，醇类燃料车的运营费用，尤其是燃油费用较高，这和醇类车燃料经济性稍低，但单位能量的燃料价格偏高有关。车辆维护费用的增加，主要是由于甲醇/乙醇车相比同类柴油车，燃料过滤装置和电子控制设备的成本高或是更换频率高。另外，甲醇/乙醇供应站建设费用差不多，建设一座可服务 80~160 辆公交车的甲醇/乙醇供应站，成本大约比同等规模的柴油加气站增加 5~10 万美元。

(9) 密苏里州 St. Louis 生物柴油公交车案例

美国能源部还对圣路易斯市生物柴油公交车的应用案例进行了研究。案例中的公交车长达 12.2 米，发动机型号为 DDC 6V92TA。参与测试的 10 辆公交车中，5 辆使用 BD20 燃料（由大豆制成的生物柴油和普通柴油体积比分别为 20%和 80%），另 5 辆使用普通柴油。

排放测试采用 CBD 驾驶循环，结果表明生物柴油公交车与普通柴油车的燃油经济性相当，排放水平也很接近，使用生物柴油后 THC 排放稍有降低，CO 排放不变，NO_x 和 PM 排放有很少的增加（在测量误差范围之内）。而根据美国环保局的一份调研报告，使用生物柴油相比普通柴油，NO_x 排放会增加 2.0%，但 PM、HC 和 CO 排放将分别降低 10.1%、21.4%和 11.0%。

2.4.2 费用效果分析

除 LPG 公交车外，本研究中的替代燃料公交车全部是和同类的柴油车进行费用效果比较。在实际应用，如北京市的公交车队中，也有相当比例的汽油车；但在引入替代燃料车时，最主要的目的是减少污染物排放特别是 PM 和 NO_x + NMHC（臭氧前体物）的排放，而重型柴油车和汽油车相比，PM 和 NO_x 的排放都要高得多；就目前北京市的机动车排放水平而言，重型柴油车的单位公里 PM 排放是重型汽油车的 5.1 倍，NO_x 是 4.2 倍，NMHC 则约为汽油车的 1/2；所以引入替代燃料车时，首先考虑取代重型柴油车。此处将采用两者的比较

结果作为参考的依据。对于 LPG 车，由于其动力性能不足以达到重型柴油车的要求，一般只能替代吨位较小的重型汽油车，所以取不同的基准作比较。

跟据上述案例和其它相关的资料数据，计算得到替代燃料公交车的单车成本增加，如图 2—4 所示。

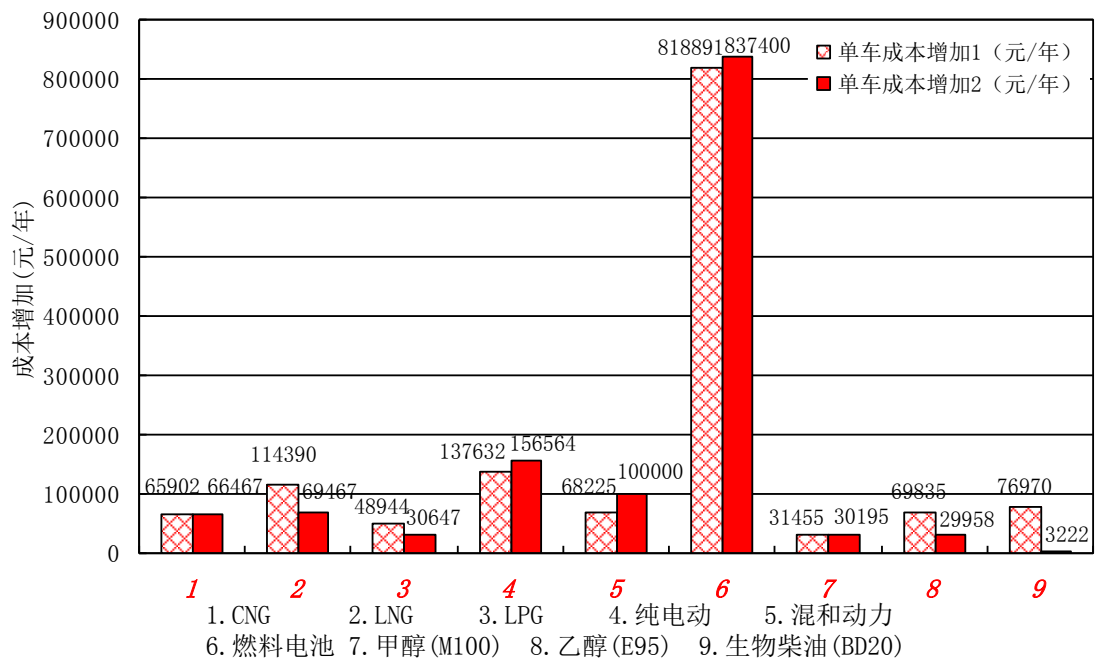


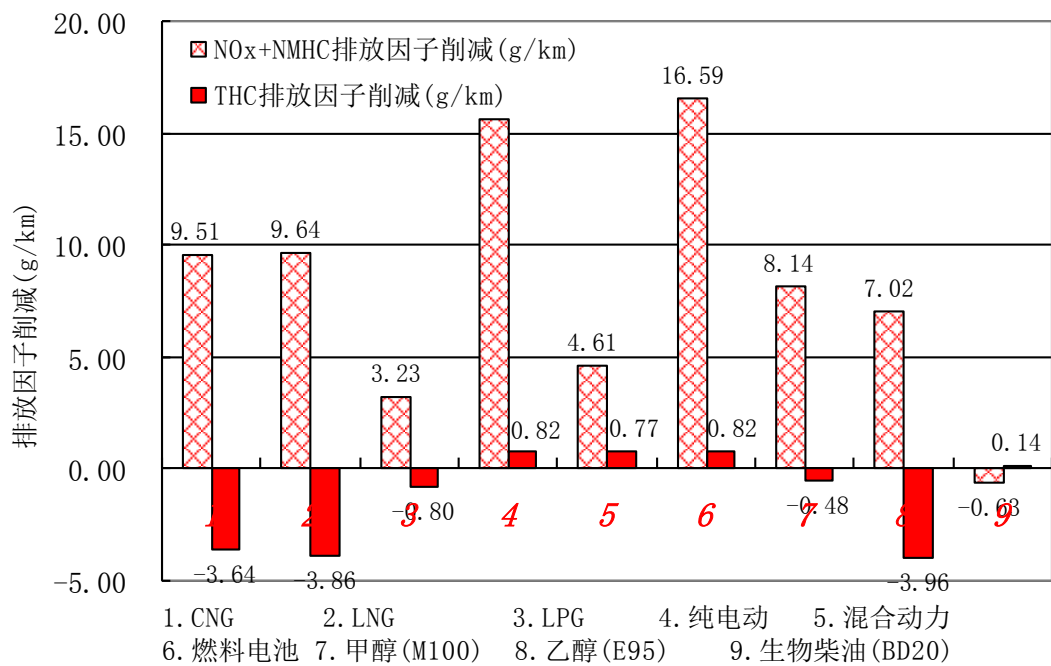
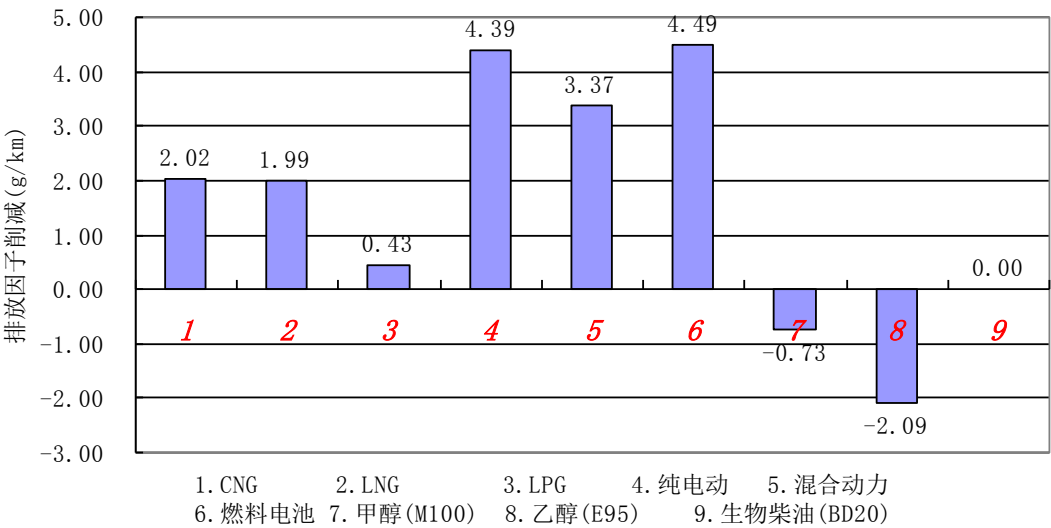
图 2-4 替代燃料公交车年均成本增加比较

从图 2—4 中可以看到，目前燃料电池车的单车成本增加非常高，超过 80 万元/年，差不多是其它替代燃料公交车中成本增加最高的纯电动车和 LNG 车的 6~7 倍。分析其原因，主要是燃料电池车在车辆购买成本上显著高于其它替代燃料车，这部分成本增加占了总成本增加的 90%以上，而且目前氢气的制造和运输成本也很高。纯电动车和 LNG 车的单车成本增加 1 也都超过了 10 万元/年，它们在车辆购买和维护成本，以及基础设施投资上有明显的增加。

单车成本增加最少的是甲醇和 LPG 公交车，甚至低于不需要改换发动机的生物柴油车，这主要是由于这两种车的燃料费用和维护费用都比较低，生物柴油车虽然在车辆上没什么变化，燃料费用却升高了一倍。其次是 CNG、混合动力和乙醇公交车，这几种替代燃料车的燃料和维护费用相比同类柴油车有一定增加，单车成本增加 1 在 6.5~7 万元/年，其中乙醇公交车最主要是燃料费用的升高，如果乙醇燃料的生产成本有较大的下降，乙醇车在成本上将具备更大的

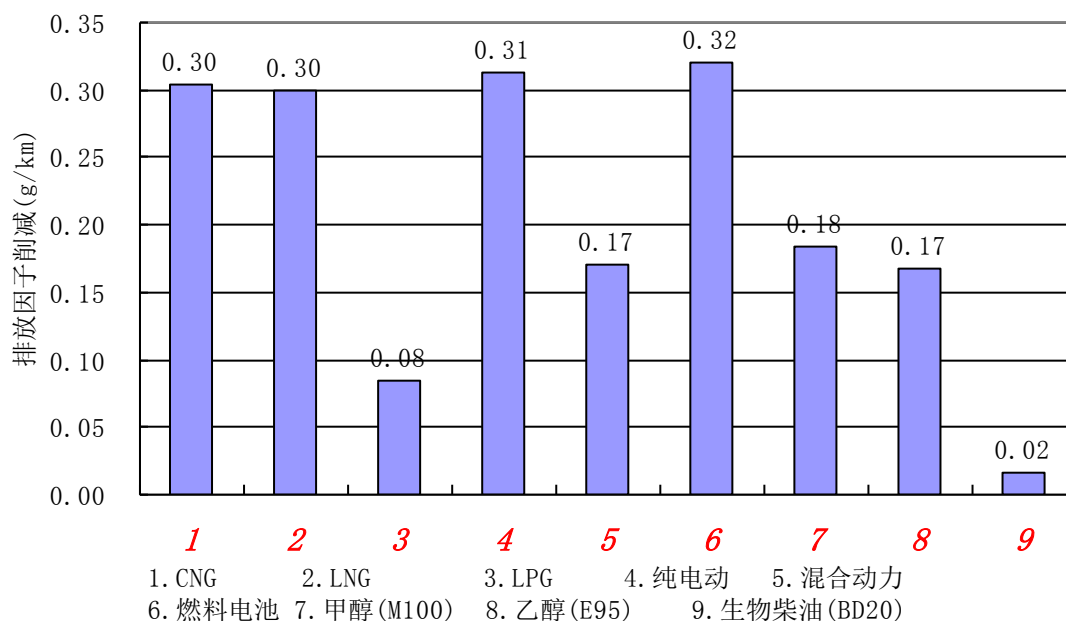
竞争力。

替代燃料公交车常规污染物的排放因子削减比较见图 2-5。需要提醒注意的是，LPG 车的比较基准是重型汽油车，和其它车辆做对比的重型柴油车不同。



(a) CO 排放因子

(b) NOx+NMHC 排放因子和 THC 排放因子



(c) PM 排放因子

图 2-5 替代燃料公交车排放因子削减比较

注：由于可获得的测试数据有限，LPG、甲醇、乙醇和生物柴油车的 $\text{NO}_x + \text{NMHC}$ 排放因子削减实际为 $\text{NO}_x + \text{THC}$ 排放，CNG—柴油混合燃料车的 THC 排放因子削减实际为 NMHC 排放。

由图 2—5 可以看出，在公交车上应用替代燃料，最有利的是 PM 排放削减，除生物柴油车外，其它替代燃料公交车比同类柴油车的 PM 排放都有明显降低；而最不利的是总碳氢化合物的排放削减，除电动车（PEV、HEV 和 FCV）和生物柴油外，使用其它替代燃料都会导致 THC 排放增加。

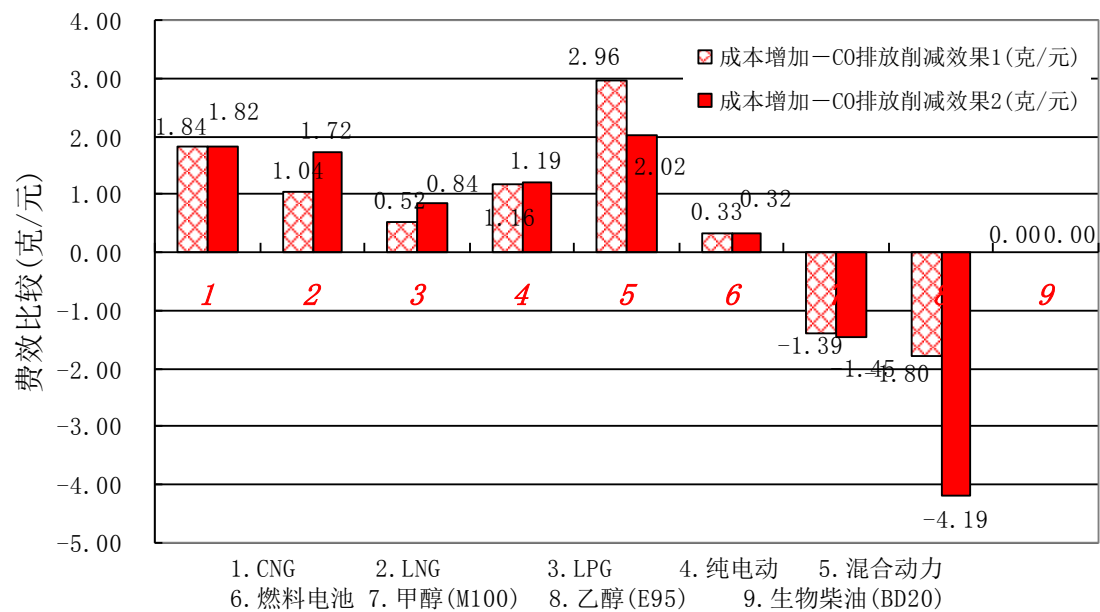
替代燃料公交车的 CO 排放削减也不是很明显。由于柴油公交车本身的 CO 排放较低，除超低排放的电动车外，应用大多数替代燃料后的 CO 削减程度和 CNG 轻型车取代同类汽油车的 CO 削减差不多，而在应用乙醇（E95）和甲醇（M100）时，CO 排放反而出现了增加。

对于 $\text{NO}_x + \text{NMHC}$ 的排放削减，总体而言比较好。除了零排放的纯电动车和燃料电池车外，CNG、LNG、甲醇和乙醇公交车的削减效果都不错，接下来是混合动力和 LPG 车。但使用 CNG、LNG 和乙醇燃料会导致 THC 排放的增加（主要是甲烷），乙醇车的 THC 排放增加则主要归因于乙醇和乙醛排放。使用生物柴油时， NO_x 排放出现了很少量的增加。

在 THC 排放比同类柴油车高出最多的替代燃料公交车中，CNG 和 LNG 车的 THC 排放明显增加主要归因于甲烷排放，而乙醇车的 THC 排放增加则主要是乙醇和乙醛排放。

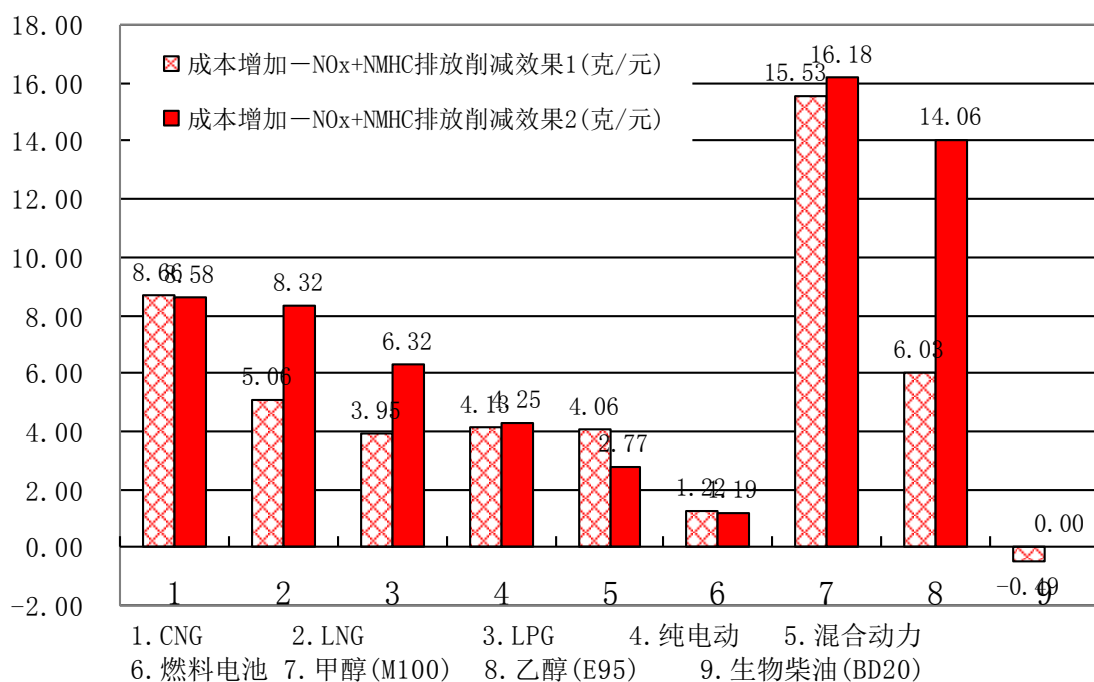
在图 2-5 (c) 中，除纯电动和燃料电池车外，CNG 和 LNG 公交车比同类柴油车的 PM 排放削减最多，然后是甲醇、乙醇和混合动力车，LPG 公交车相比同类汽油车对 PM 排放也有一定削减，而生物柴油车的削减最不明显。

根据公式(2-3)和(2-4)，计算得到替代燃料公交车各案例中的成本增加—排放削减效果，结果如图 2-6 所示。需要说明的是由于生物柴油的单车成本 2 增加非常小，排放削减效果也很小，因此其费用效果 2 的计算结果没有太大的实

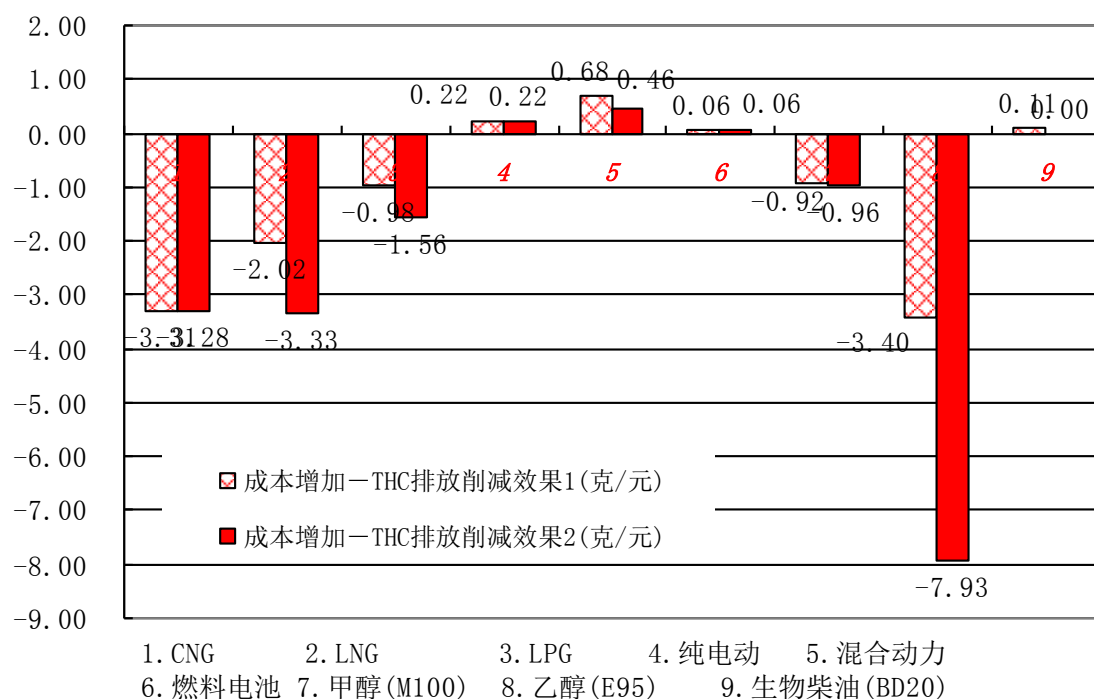


际意义，在图中均以零表示。

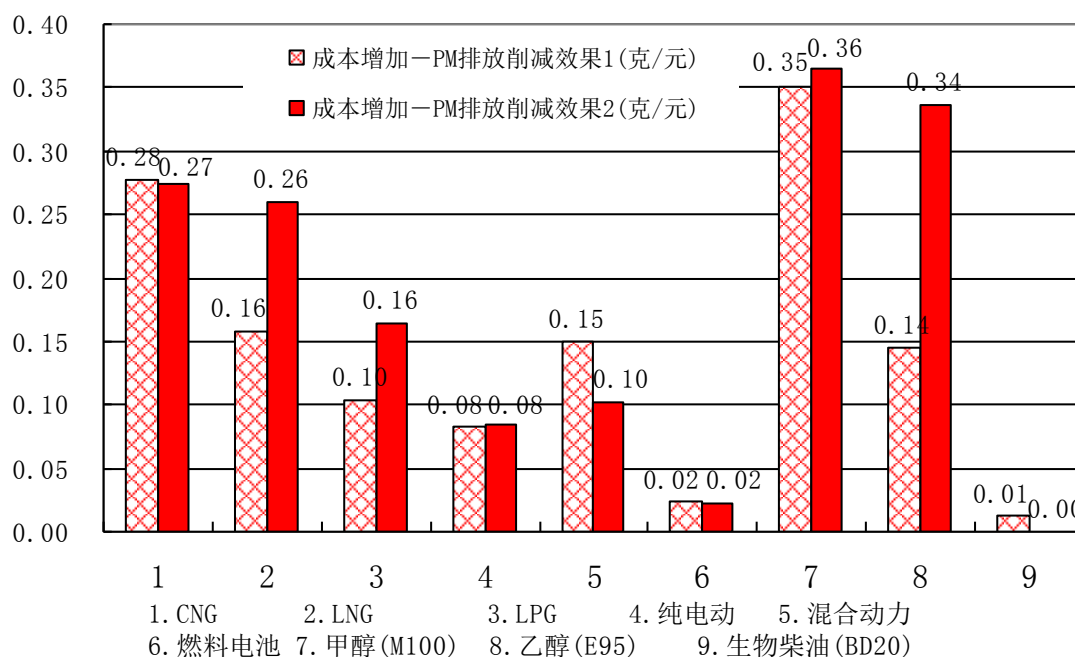
(a) CO 排放削减的费用效果



(b) NO_x+NMHC 排放削减的费用效果



(c) THC 排放削减的费用效果



(d) PM 排放削减的费用效果

图 2-6 替代燃料公交车的费用效果比较

从图 2—6 中可以得到如下结论：

- 混合动力公交车在 CO 排放削减上的费用效果最好，其次是 CNG 公交车。纯电动车和 LPG 车的费用效果也比较好。甲醇和乙醇车出现了比较明显的负效果。
- 在 NO_x+NMHC 排放削减的费用效果上，甲醇和乙醇车为最优，这与其单车成本增加最少有关；其次是 CNG 车、LNG 车、纯电动车和混和动力车，而生物柴油车则出现了负效果。
- 除了电动车（PEV、HEV 和 FCV）和生物柴油车以外，其它各种替代燃料公交车在 THC 排放削减上的费用效果都表现了明显的负效果。
- 甲醇公交车在 PM 排放削减上的费用效果最好,这与其单车成本增加最少有关；其次是 CNG、LNG、混合动力以及乙醇公交车。其它替代燃料公交车在 PM 排放削减上的费用效果都低于 0.10 克/元。

综上，如果暂不考虑 THC 排放增加带来的负面影响，CNG 车、混和动力车和甲醇车是公交车领域首选的替代燃料车型；CNG 车带来的 THC 排放增加主要是甲烷，对局地空气质量的影响很小。但关于甲醇车，正如第一章所提到的，

其应用可能造成较多有毒的甲醇和甲醛排放，由于数据有限，在上面几种常规污染物排放削减效果的比较分析中没有包括；就北京市的替代燃料车发展规划而言，不适宜引入这种可能带来较大负效应的车型，何况甲醇车还存在续驶里程短等、燃料系统要求高等缺点；建议先在国内其它地区进行试点或进一步发展。纯电动车和燃料电池车在各种污染物排放上都有显著削减，但高成本导致费用效果比较低，目前只能做小规模示范运行，特别是燃料电池车，只有等待技术进步后成本大幅下降，它们才有可能大规模发展。LNG 公交车的费用效果不如 CNG 车，作为同一种替代燃料的不同应用形式，应优先选择专用 CNG 公交车。乙醇和生物柴油车在污染物排放削减上的费用效果不好，从改善空气质量的目的出发不宜考虑；但如果出于能源结构调整的角度，建议可在国内其它地区进行试点。

2.5 卡车应用替代燃料的费用效果分析

2.5.1 应用案例简介

(1) UPS CNG 卡车案例

1997 年到 2000 年间，美国能源部对 UPS(世界最大的快递和包裹运输公司)的 13 辆 CNG 卡车和 3 辆柴油卡车进行了排放测试比较，CNG 车和柴油车发动机分别采用 Cummins B5.9G 和 Cummins B5.9 型,前者装备尾气催化转化器，后者没有。经过能量折算后，CNG 车和柴油车燃料储存容量分别为 15.3 加仑柴油和 35 加仑柴油。数据收集的过程中，车辆每天工作 12 小时，按照地图软件精确规划的路线行驶，CNG 卡车的续驶里程约为 125 英里，而柴油车续驶里程约为 350~400 英里。采用城市郊区重型车行驶路线测试循环，得到的排放数据表明，CNG 卡车的主要污染物排放因子较柴油车有较大程度降低，例如，CO 降低 75%，NO_x 降低 49%，PM 降低 95%，CO₂ 降低 7%。

UPS CNG 卡车较一般柴油卡车，单车购买成本增加 15000 美元。车辆行驶成本比较如表 2-10 所示。

表 2-10 UPS CNG 卡车与柴油卡车行驶费用比较

	UPS CNG 卡车	柴油卡车
平均燃油费用(RMB/km)	0.725	0.566

平均维护费用(RMB/km)	0.955	0.858
平均行驶费用(RMB/km)	1.680	1.424

UPS 在 Hartford 和 Waterbury 地区各耗资\$500000 建设 CNG 加气站，分别为 101 辆和 85 辆的 GNG 卡车供应燃料。单车加气时间 3~5 分钟，而一般柴油卡车加油时间少于 3 分钟。

(2) WMI LNG 环卫车案例

LNG 在重型车领域应用比较十分广泛。DOE 在 1997 年到 2000 年间对宾夕法尼亚州废弃物管理公司(Waste Management Inc.)车队的 5 辆 LNG 卡车和 3 辆柴油卡车的成本、维护、行驶数据和排放测试数据进行了收集。经过比较得到的总体结论是，LNG 车在行驶过程中，无黑烟和气味产生，在噪声控制和动力性方面都优于柴油车，但车辆维护费用也相应较高。

实验的 LNG 卡车和柴油车发动机分别采用 Mack Trucks 公司的 Mack E7G-325 和 Mack E7-300,均未安装尾气催化转化器。LNG 车燃料储备容量为 150 加仑 LNG(按等效能量折算后约 90 加仑柴油)，柴油车燃料储备容量为 72 加仑柴油。实验过程中，LNG 车行驶里程约 1688 英里/月，而柴油车行驶里程约 2295 英里/月，按照 CBD 驾驶循环(The Standard Central Business District Cycle，中心商业区标准驾驶循环)进行排放测试。结果表明，LNG 车的 NO_x，PM 和 CO₂ 排放较柴油车分别减少 16%，94%和 21%，主要污染物排放较柴油车有较大幅度的降低。

Waste Management Inc.的 LNG 卡车单车成本较一般柴油卡车增加约 40000 美元。其车辆行驶费用与柴油卡车比较如下：

表 2-11 Waste Management Inc. LNG 卡车与柴油卡车行驶费用比较

	LNG 卡车	柴油卡车
平均燃油费用(RMB/km)	2.984	2.168
平均维护费用(RMB/km)	2.037	1.352
平均运营费用(RMB/km)	5.021	3.520

该车队的 LNG 加气站建设费用约为 50 万美元，供气速率约 30 加仑 LNG/分钟。

(3) Raley LNG 卡车案例

1997 年 Raley 超级市场车队开始使用 LNG 车运输物资，LNG 卡车和柴油卡车月行驶里程大约分别为 4489 英里和 6182 英里。DOE 对其中 8 辆 LNG 卡车和 2 辆 LNG 堆场牵引车的使用维护和排放特征进行了为期 12 个月的调研分析，并与柴油卡车进行比较。测试车辆中，LNG 车和柴油车采用 Cummins L10-300G 贫燃发动机和 Cummins M11-330 发动机，均未设置尾气催化转化装备，燃料储备容量分别为 174 加仑 LNG(按等效能量折算后约 104 加仑柴油)和 114 加仑柴油。

每辆车都接受 2 次污染物排放测试，分别在 1997 年中和 1998 年早期进行，每次测试过程中车辆需至少完成 3 次 5-mile Route（5 英里线路；模拟 5 个峰值，每个峰值由加速、均速行驶和减速段构成，峰值之间为怠速段）驾驶循环，按所得排放数据的平均值作为该次测试的结果。具体数据见下表所示：

表 2-12 Raley LNG 卡车与柴油卡车排放因子比较

单位： (g/mile)	LNG 卡车			柴油卡车		
	1997	1998	平均	1997	1998	平均
CO	7.12	7.92	7.52	1.88	2.26	2.07
NO _x	5.16	5.25	5.21	31.83	19.59	25.71
NMHC	0.60	0.62	0.61	1.29	1.70	1.50
PM	0.07	0.04	0.06	0.84	1.22	1.03
CO ₂	1657	1821	1739	1620	1658	1639

由此可见，LNG 车较柴油车，NO_x 排放减少约 80%,PM 排放减少更是达到 96%，不过 CO 排放有所上升。

该类型卡车较同类柴油车单车成本增加大约\$35000。其车辆行驶费用与柴油卡车比较如下：

表 2-13 Raley LNG 卡车与柴油卡车行驶费用比较

	LNG 卡车	柴油卡车
平均燃油费用(RMB/km)	1.841	0.905
平均维护费用(RMB/km)	0.493	0.247
平均运行费用(RMB/km)	2.335	1.151

该车队 LNG 加气站建设耗资约 35 万美元，容量为 13000 加仑 LNG。

(4) 加州 Ralph's Grocery 公司低硫柴油案例

柴油中含硫过多，会造成尾气催化剂中毒而使主要污染物如 NO_x 排放增加。加州 Ralph's Grocery 车队是美国应用低硫柴油卡车比较成功的案例之一。在 DOE 对该案例进行评估测试过程中，20 辆卡车都采用 Detroit Diesel Series 60 发动机，其中 15 辆卡车使用 ECD 超低硫柴油，5 辆卡车使用加州普通柴油，车上都安装了消声器，但下面讨论的测试车辆均未使用可再生柴油颗粒物过滤器。评估时间超过 12 个月，所有车辆的累积行驶里程都达到约 15 万英里。

车辆的排放测试中选择了两种不同的驾驶循环，分别是 5-mile Route 和 CSHVR（City Suburban Heavy Vehicle Route,城市郊区重型车线路）驾驶循环。测试结果如下表所示：

表 2-14 低硫柴油与普通柴油卡车排放因子比较

单位 (g/mile)	5-mile Route 驾驶循环		CSHVR 驾驶循环	
	ECD 柴油	加州常规柴油	ECD 柴油	加州常规柴油
CO	2.01	2.78	6.81	7.78
NO _x	27.94	35.00	34.52	40.91
HC	0.164	0.164	0.256	0.272
PM	0.106	0.089	0.211	0.197
CO ₂	1397	1439	1907	2002

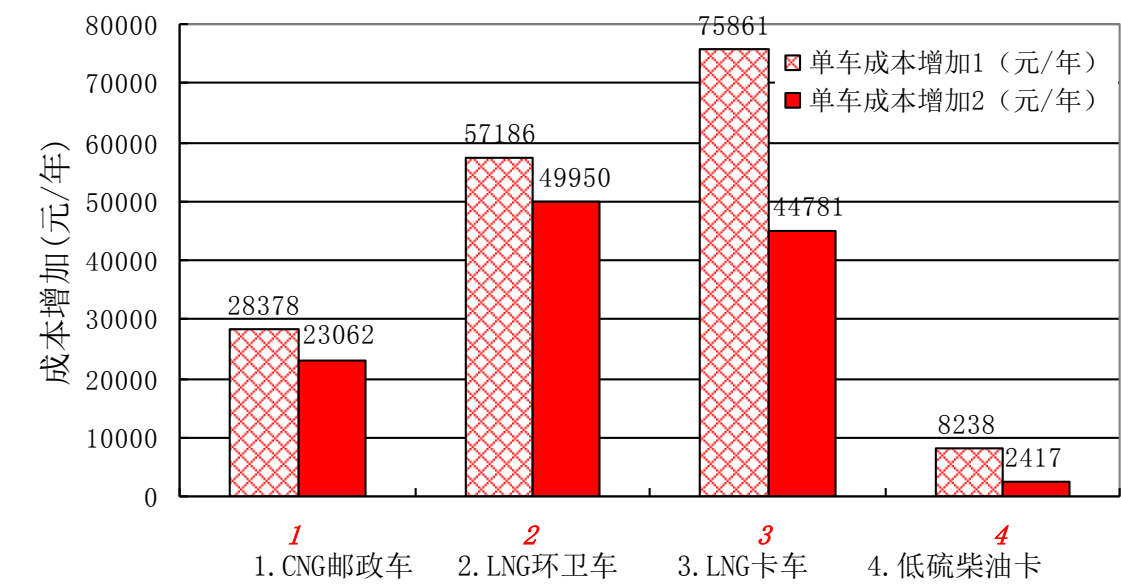
NO_x 的排放和预期一样，使用低硫柴油有 16~20% 的降低；CO 和 HC 的排放也略有下降。CO₂ 排放的下降，可能是低硫柴油性能提高而导致燃烧效率增加，也可能与车辆本身或测量误差有关。比较令人奇怪的是，使用低硫柴油的卡车，PM 排放反而略高于使用常规柴油的车辆，按一般的分析，柴油硫含量的下降应该会减少细微颗粒物的排放，而测试得到这个结果，比较可能的原因是车辆本身的差异。

使用低硫柴油对车辆本身没有特别要求，在单车购买成本没有变化，加气站等基础设施建设也不需要额外投资。燃油和车辆的维护费用比使用普通柴油的车辆稍高，运营成本分别为 1.577RMB/km 和 1.505RMB/km，两者相差不大。因此，低硫柴油车的成本增加很少。

2.5.2 费用效果分析

出于和替代燃料公交车一样的原因，此处使用替代燃料的卡车全部是和同类的柴油车进行比较。

依据上述案例和其它调研到的资料数据，计算得到的单车成本增加如图 2



—7 所示。

图 2-7 替代燃料卡车年均成本增加比较

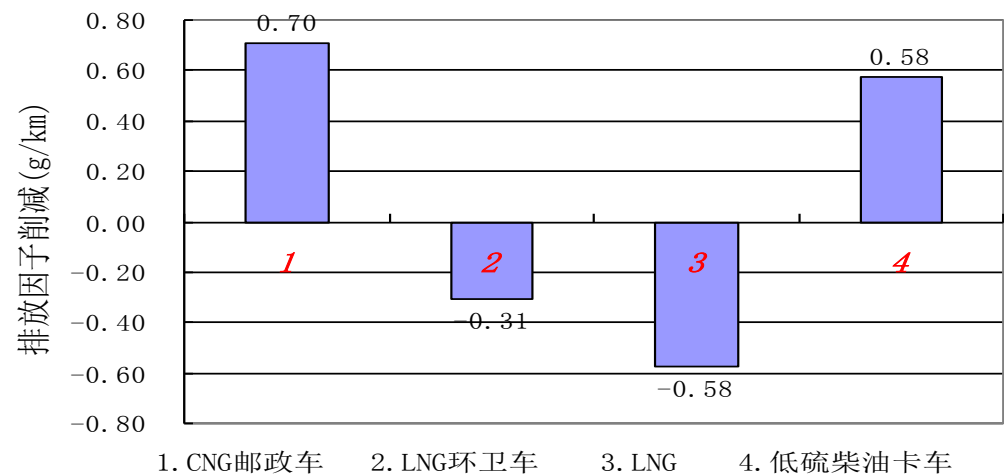
从图上可以看到，替代燃料卡车的单车成本相比同类柴油卡车有较大程度的增加，CNG 邮政车的单车成本增加高于替代燃料轻型车中成本增加最大的 E85 轻型灵活燃料车，更不用说 LNG 环卫车和卡车，即使低硫柴油卡车亦同 CNG 小公共和 LPG 出租车的成本增加差不多。其中，LNG 环卫车和卡车的成本增加是最高的，在 CNG 邮政车的两倍左右甚至更高，更远远高于使用低硫柴油的卡车。

分析 LNG 环卫车和卡车的单车成本增加明显高于 CNG 邮政车的原因，是车辆单位行驶里程的维护和燃料费用都大大增加。LNG 车对低温和密封等条件要求严格，容易发生燃料泄漏，驾驶员对其续驶里程一开始也缺乏了解，这些都导致在刚使用时经常出现告警或燃料不足而被迫停车求援的情况，这使得非定期的维护费用显著增加；但另一方面，LNG 成分简单，燃烧后杂质少，延长

了发动机寿命，润滑油的更换周期也比汽/柴油车长，所以LNG车的定期维护费用比汽/柴油车低，总体而言，LNG车的维护成本一般高于同类汽/柴油车（在对LNG车的使用熟悉以后，维护成本会逐渐降低，甚至可能低于汽/柴油车，参见后面的DART's LNG公交车案例）。LNG车的燃料经济性比柴油车也有明显的下降，少则降低10%，多则降低30~40%，而LNG的价格从单位能量上看，要高于柴油（上述案例中高出25%左右），因而燃料费用的增加比维护费用更为显著。

另外一点需要关注的是，CNG邮政车的成本增加相比前面的CNG轻型车高出很多。其中主要增加的费用有：（1）CNG卡车的制造成本增加，比轻型车高很多（\$15000 vs. \$3000）；（2）维护费用上CNG卡车明显高于轻型车，比同类柴油车亦有增加；（3）CNG卡车的燃料经济性和同类柴油车比较有明显降低，而CNG轻型车和同类汽油车水平相当，燃料费用上CNG卡车有较大增加。

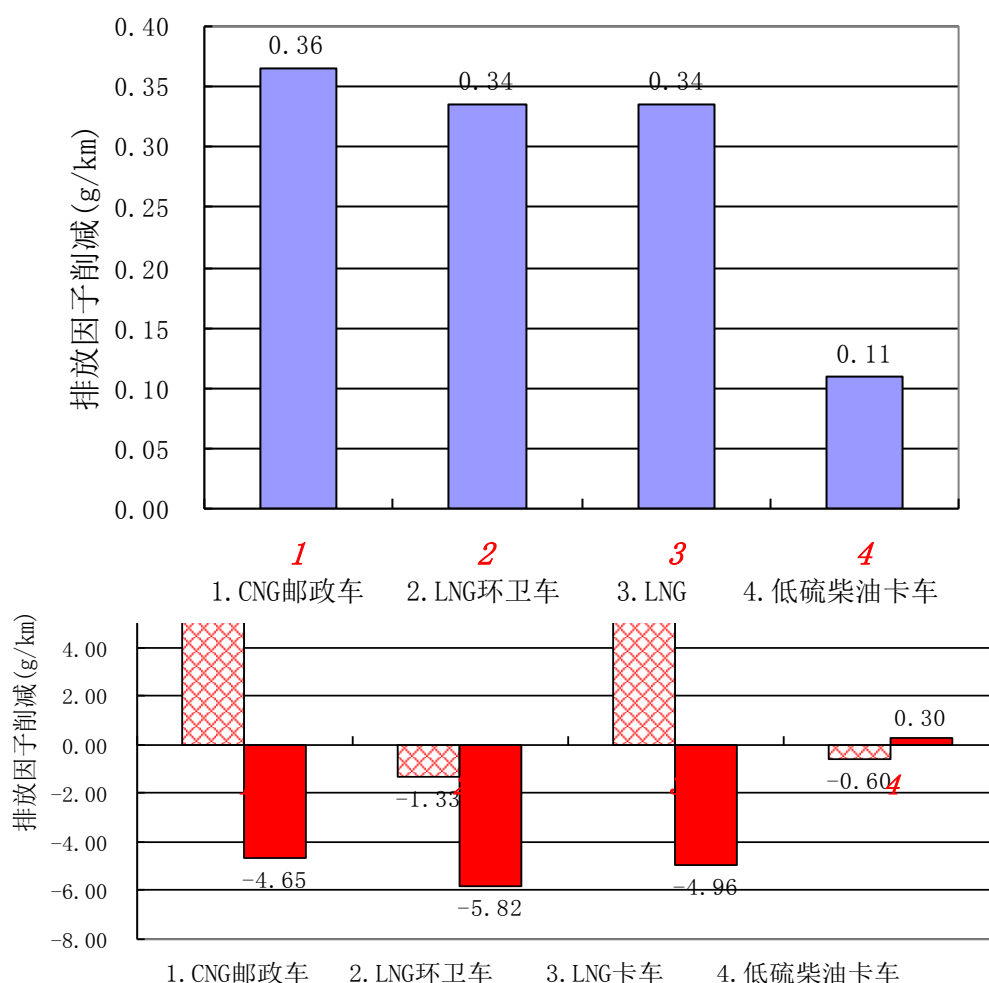
比较图2-7和图2-4，可以看到，除了燃料电池车和纯电动车外，替代燃料卡车的单车成本增加和公交车基本处于同一水平，这也表明在不同重型车上应用同一替代燃料的成本增加相差不大。



替代燃料卡车常规污染物的排放因子削减比较见图2-8。

(a) CO 排放因子

(b) NO_x+NMHC 和 THC 排放因子



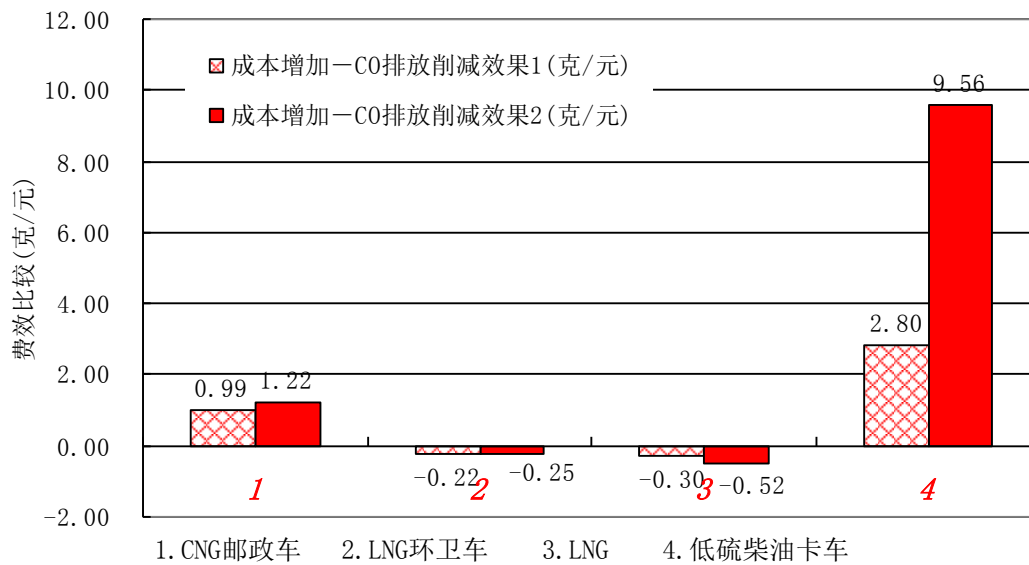
(c) PM 排放因子

图 2-8 替代燃料卡车排放因子削减比较

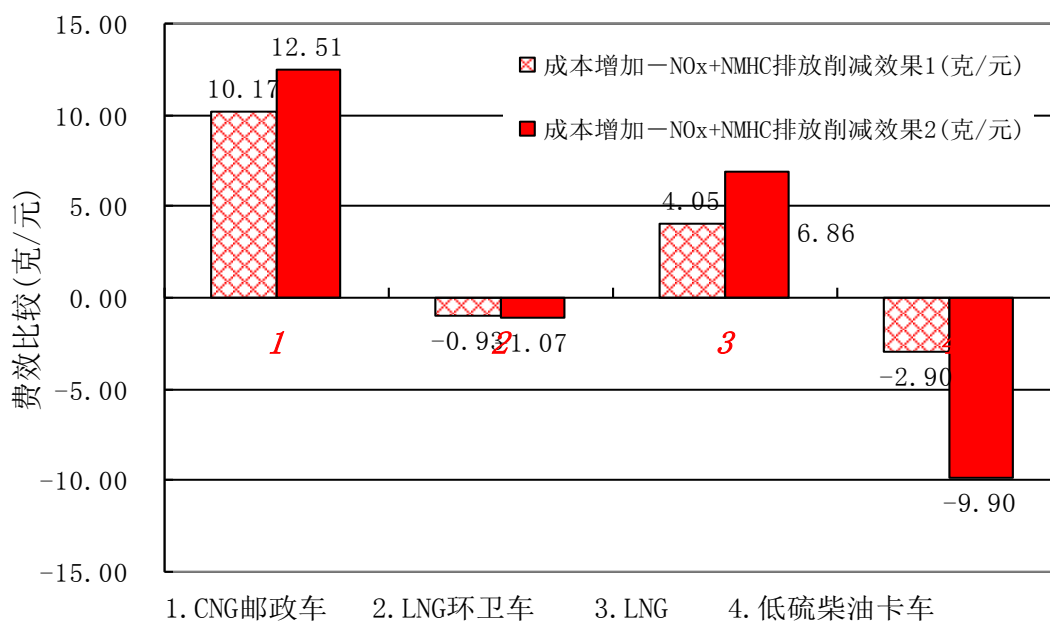
结果表明，使用替代燃料的卡车相比同类柴油车，CO 排放有增有减。由于柴油发动机燃烧效率较高，车辆本身排放 CO 较低，使用替代燃料后 CO 排放稍有增加的影响不大。除了 LNG 环卫车和低硫柴油卡车，替代燃料卡车的 NO_x+NMHC 排放都比同类柴油车有明显的削减，LNG 环卫车是因为 NO_x 排放高出了同类柴油车。但在 THC 的排放上，CNG 和 LNG 卡车都高于同类柴油车，主要是因为使用天然气大大增加了甲烷的排放，这个负面效应在仅考虑局地大气环境时不太重要，但甲烷是一种重要的温室气体，对于全球气候变化有着不可轻视的影响。使用 CNG、LNG 和低硫柴油，对颗粒物排放的削减都很显著，这也

正符合北京市发展替代燃料车的最重要目的。

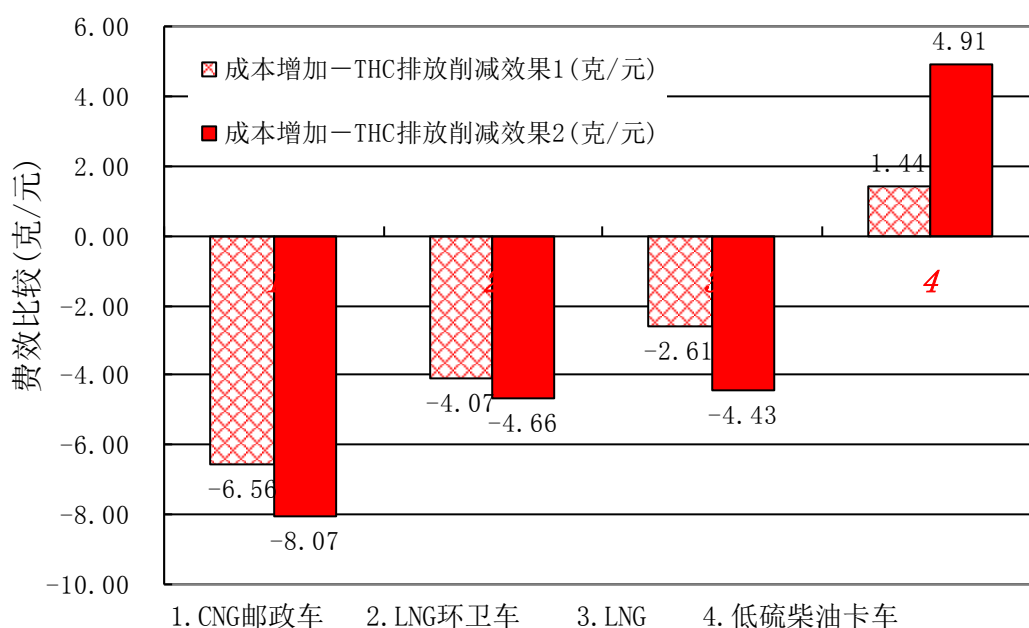
根据公式(2-3)和(2-4)计算出替代燃料卡车各案例中的成本增加—排放削减效果，结果如图 2—9 所示。



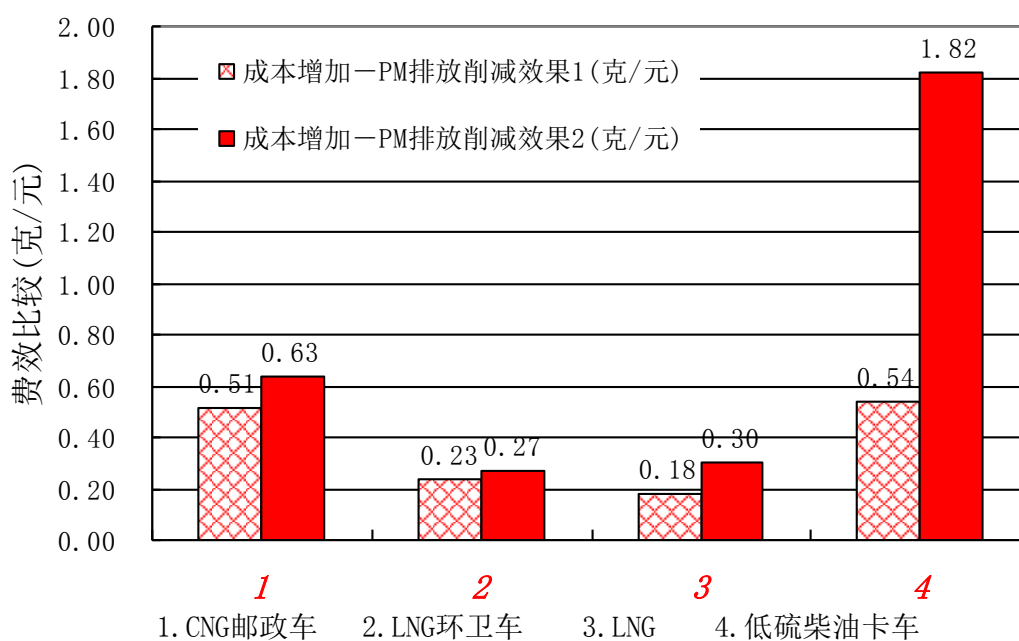
(a) CO 排放削减的费用效果



(b) NO_x+NMHC 排放削减的费用效果



(c) THC 排放削减的费用效果



(d) PM 排放削减的费用效果

图 2-9 替代燃料卡车的费用效果比较

从图 2-9 中对替代燃料卡车的费用效果进行比较，可得到如下结论：

- (2) 低硫柴油削减 PM 的费用效果明显，与其相对低的成本增加有关；天然气卡车在 PM 排放削减上的费用效果也不错，且 CNG 车明显好于 LNG 车，是后者的 2 倍以上。

- (3) CNG 邮政车削减 CO 和 NO_x+NMHC 的费用效果明显。在 NO_x+NMHC 排放削减的费用效果方面, 使用低硫柴油表现出比较明显的负效果, 这与其相对低的成本增加有关。LNG 环卫车在 CO 和 NO_x+NMHC 的排放削减上都表现出负效果, 而 LNG 卡车在 CO 排放削减上呈现负效果。
- (4) 天然气卡车在 THC 排放削减上都呈现显著的负效果, 这是需要注意的。使用低硫柴油对降低 THC 排放的费用效果也不是很高。

综上所述, 由于对北京市目前的大气污染控制而言, PM 排放的削减是最重要的, 其次是 NO_x+NMHC, 而重型柴油车在所有车型中 PM 排放的分担率最高(2000 年为 41%), NO_x 排放的分担率也比较高(2000 年为 26%), 因此从削减卡车 PM 排放的角度考虑, 选择低硫柴油和 CNG 卡车比较好; 如果再考虑 NO_x+NMHC 排放的削减, 选择 CNG 更有保证。

如果我们不仅考虑当前的局地环境, 而是着眼于长远规划和全球环境, 天然气车在甲烷排放上的显著增加就必须加以重视, 这将是使用天然气燃料的一个负效应。但随着技术的发展, 未来也很可能出现针对甲烷的催化转化器, 通过促进天然气的完全燃烧而大大降低甲烷排放。

在推广天然气卡车的实际过程中, 应重视加气站等基础设施建设的问题, 避免出现发展瓶颈。

2.6 替代燃料车费用效果分析结论

根据上述各种替代燃料车在污染物排放削减上的费用效果分析, 结合北京市的具体情况, 可以得到如下的结论:

- (1) 在目前比较可行的应用中, 混合动力轿车的费用效果最好, 其次是 CNG 和 LPG 轻型车(包括专用车和双燃料车), 醇类车在排放削减的效果上不明显, 甲醇车还存在有毒物质排放的问题。由于轻型汽油车相比于其他车型, 发动机和排放控制技术、油品质量等均提高很快, 其污染物排放会大幅降低, 未来应用替代燃料车对污染物排放的削减效果不会非常显著。特别是国内目前最关心的 PM 排放, 由于汽油车本身 PM 排放很低, 预测的 2008 年北京市轻型汽油车 PM 平均排放因子只有 0.009~

0.022 g/km，已没有多少的削减余地。但另一方面，由于轻型车保有量在各类车中最大，在该领域发展替代燃料车，对于调整能源结构和一定程度上降低污染物排放仍具有十分重要的意义，首选车型为技术趋近成熟、燃料供应充足且价格适中的混合动力轿车。

(2) 如果暂不考虑 THC 排放增加带来的负面影响，CNG 车、混合动力车和甲醇车是公交车领域首选的替代燃料车型；CNG 车带来的 THC 排放增加主要是甲烷，对局地空气质量的影响很小。但甲醇车的应用可能造成较多有毒的甲醇和甲醛排放，北京市不宜过早引入这种可能还存在较多问题的车型，建议先在国内其它地区进行试点或进一步发展。纯电动车和燃料电池车在各种污染物排放上都有显著削减，但高成本导致费用效果比较低，目前只能做小规模示范运行，特别是燃料电池车，只有等待技术进步后成本大幅下降，它们才有可能大规模发展。LNG 公交车的费用效果不如 CNG 车，作为同一种替代燃料的不同应用形式，应优先选择专用 CNG 公交车。乙醇和生物柴油车在污染物排放削减上的费用效果不好，从改善空气质量的目的出发不宜考虑；但如果出于能源结构调整的角度，建议可在国内其它地区进行试点。

(3) 就北京市目前的大气污染控制而言，从削减卡车 PM 排放的角度考虑，选择低硫柴油和 CNG 卡车比较好；如果再考虑 NO_x+NMHC 和 CO 排放的削减，选择 CNG 更有保证。但是，需要注意目前使用天然气燃料会造成甲烷排放明显增加。

参考文献

- [1] Peg Whalen, Ken Kelly, Mardi John. Barwood CNG Cab Fleet Study: Final Results. DOE NREL, NREL/TP-540-26035, May 1999
- [2] Y. Huang, R.D. Matthews, and E.T. Popova. Texas Bi-Fuel Liquefied Petroleum Gas Pickup Study: Final Report. DOE NREL, NREL/SR-540-26003, May 1999
- [3] Eva LIU, S.Y. YUE, Joseph LEE. A Study On LPG As A Fuel For Vehicles. Research and Library Services Division Legislative Council Secretariat. March 1997
- [4] U.S. Department of Energy. Hertz Puts You In The Driver's Seat — And Methanol In Your Tank. April 1997
- [5] Kevin Chandler, Margaret Whalen, Jeffrey Westhoven. Final Results From The State Of Ohio Ethanol-Fueled Light-Duty Fleet Deployment Project
- [6] Kevin Chandler, Kevin Walkowicz, Nigel Clark. United Parcel Service CNG Truck Fleet: Final Results. U.S. Department of Energy. August 2002.
- [7] Kevin Chandler, Paul Norton, Nigel Clark. Waste Management's LNG Truck Fleet: Final Results. U.S. Department of Energy. January 2001
- [8] U.S. Department of Energy. Using LNG as a Fuel in Heavy-Duty Tractors: NREL Vehicle Evaluation Program. July 1999
- [9] L.B. Hill. Diesel Engines: Emissions Controls and Retrofits. Clean Air Task Force. 2003
- [10] Robert Motta, Paul Norton, Kenneth Kelly, Kevin Chandler, Leon Schumacher, Nigel Clark. Alternative Fuel Transit Buses: Final Results from the NREL Vehicle Evaluation Program. U.S. Department of Energy. October 1996
- [11] Alberto Ayala, Norman Y. Kado, Robert A. Okamoto, Britt A. Holmén, Paul A. Kuzmicky, Reiko Kobayashi, Keith E. Stiglitz. Diesel and CNG Heavy-duty Transit Bus Emissions over Multiple Driving Schedules: Regulated Pollutants and Project Overview. Society of Automotive Engineers Paper 2002-01-1722.

2002

- [12] U.S. Department of Energy. The Pierce Transit Story. January 1998
- [13] Paul Norton. Demonstration of Caterpillar C-10 Dual Fuel Engines in MCI 102DL3 Commuter Buses. DOE NREL, NREL/SR-540-26758. January 2000
- [14] Kevin Chandler, Paul Norton, Nigel Clark. Dallas Area Rapid Transit's (DART) LNG Bus Fleet: Final Results. DOE NREL. October 2000
- [15] Indian Committee on Auto Fuel Policy. Report of the Expert Committee on Auto Fuel Policy, Chapter 9: Alternative Auto Fuels - CNG and LPG. August 2002
- [16] U.S. Department of Energy. Electric Buses Energize Downtown Chattanooga. August 1997
- [17] Four Year Report on Battery-Electric Transit Vehicle Operation at the Santa Barbara Metropolitan Transit District. WestStart - CALSTART, Inc. 1996
- [18] Kervin Chandler, Kevin Walkowicz, Leslie. New York City Transit Diesel Hybrid-Electric Buses: Final Results. DOE NREL Transit Bus Evaluation Project. July 2002
- [19] Leslie Eudy, Richard Parish, Jonathan Leonard. Hydrogen Fuel Cell Bus Evaluation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535. 2001
- [20] http://www.ctts.nrel.gov/heavy_vehicle/emissions.html
- [21] Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. U.S. Environmental Protection Agency. October 2002
- [22] EPA (2003) . Green vehicle guide. URL: <http://www.epa.gov/autoemissions/select.htm> Last updated on December 5th, 2003
- [23] 王全录. 美国混合动力技术现状与发展. 混合动力技术研讨会, 北京, 2003.11.

第三章 北京市燃气汽车发展规划研究

北京是国内最早开始应用燃气汽车的城市之一，在这方面有很多的经验和教训，既有成功之处，也有不少需要反思和改正的地方。本章将首先简要回顾国内外燃气汽车的发展情况，然后根据北京市燃气汽车的应用现状，研究和分析应用燃气汽车的污染物排放削减效果和各种相关问题，同时基于北京市未来机动车保有量和排放水平的发展预测，提出 2008 年燃气汽车的发展规划，并加以评估。

3.1 国内外燃气汽车的发展情况研究

3.1.1 国外的发展情况研究

天然气汽车的使用具有悠久的历史背景，早在 1930 年代，意大利出于“自给自足”的需要，开发利用了天然气这一国内最丰富的自然资源并首先用作运输燃料。到六十年代，虽然石油的普及对其造成了一定的冲击，但由于意大利的特殊环境，天然气仍是一种具备良好成本效益的燃料，不过也基本沿用旧资源而没有大的进展。七十年代的石油危机，造就了天然气行业的全面复兴，但主要是保证工业、发电和取暖，天然气汽车尚未受到重视。直到八十年代，意大利开始从阿尔及利亚进口天然气，解决了燃料供应问题，加上配送管网系统有了较大的发展，从保护环境的角度出发，天然气汽车受到了日益增加的重视。到了 1990 年代，除了天然气汽车发展的大环境有了显著的改善外，新的车辆技术也不断出现，菲亚特汽车公司于 1997 年开始出售 MAREA BIPOWER 轿车，这是全世界第一款安装两套喷射系统的两用燃料车型，两套喷射系统分别使用 CNG 和汽油，采用了电控顺序定时技术。一年半之后推出的 MULTIPLA BIPOWER 车型新增了一套改进型的电子喷射系统，其性能与汽油车相同，续驶里程也很理想，由于采用了在汽车底盘下安装气瓶的解决方案，载客空间和行李舱空间都没有被占用。当前，这种车型的需求量可以很容易地超过每月 1000 辆的水平。天然气在公共汽车中的应用也不断增加，轿车中所采用的多点喷射技术被应用于公共汽车，并在排放方面取得了良好的效果，甚至低于新的“欧洲生态汽车”限值。

如今，全世界大约有 120 万辆车使用天然气，约占车辆总数的 0.18%。拥有天然气汽车比较多的国家包括阿根廷、意大利、加拿大、美国和新西兰。阿根廷的天然气汽车数量为全球最多，目前约有 60 万辆，但大部分为改造车。阿根廷拥有丰富的天然气资源，石油资源虽能满足本国需求，但相对有限，目前天然气在阿根廷的国内燃料市场所占份额已近 50%。在阿根廷，使用天然气的成本可比汽油降低约 60%，使得加气站的投资一度成为热潮，在 1985-1991 年期间，加气站投资的回收期不到两年。但在城市公共交通方面，将柴油公交车改装为天然气汽车的初步尝试却遭到失败，因为政府对柴油的价格补贴使得绝大多数为私营的公交公司偏向于使用柴油，不过阿根廷政府当局的一些部门正在考虑颁布一项强制要求柴油公交车改装为天然气汽车的行政法规。

目前世界上有 38 个国家使用超过 400 万辆 LPG 车，每天用于交通运输的 LPG 约有 33 万桶。在亚太经济合作组织(APEC)国家中，澳大利亚拥有最多的 LPG 汽车，约为 50 万辆，占汽车总保有量的 5%，同时配有 3300 个加气站。在澳大利亚，LPG 是免税燃料，因此价格比汽油要低，需求增长快速。美国和加拿大分别拥有约 19 万和 13 万辆 LPG 汽车，但都发展缓慢，美国的 LPG 车保有量自 1995 年以后仅以年均 1.3% 的速率增长，而加拿大近年来对 LPG 车的市场需求则有所减少。在日本，日产和丰田公司都是 LPG 燃料出租车的原产商，日本 90% 的出租车使用 LPG，并且每年还生产 4.5 万辆新车以替代在用的出租车，对于车辆和加气站在经济上会提供一些鼓励措施。

从上面所列的世界各国车用天然气和液化石油气的发展情况可以看出，开发应用替代燃料的推动力除了保护环境外，更重要的是能源战略的调整。对于石油进口国，石油危机的出现会驱使他们去寻找替代能源，而开发利用本国所具备的丰富资源是最安全且经济的途径。对于车辆使用者，选择一种燃料的最主要驱动力则是较低的运营成本和方便可靠的使用条件。对于目前世界上的发达国家和大多数发展中国家而言，车用燃料主要还是汽油和柴油。

天然气车和液化石油气车辆近 10 年来在美国的保有量变化由表 3-1 给出，其中 2003 年以后数据为预测值（DOE EIA，2004）。

表 3-1 1995-2004 年美国燃气汽车保有量(辆)

燃料类型	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
LPG	172,806	175,585	175,679	177,183	178,610	181,994	185,053	187,680	190,438	194,389
CNG	50,218	60,144	68,571	78,782	91,267	100,750	111,851	120,839	132,988	143,742
LNG	603	663	813	1,172	1,681	2,090	2,576	2,708	3,030	3,134

注：斜体字为预测值；

由表 3-1 可以看到，从 1995 年以来，使用 LPG、CNG 和 LNG 的替代燃料车在美国均有一定程度的发展。相比之下，CNG 车的增长率明显高于 LPG 车；而 LNG 车虽然相对增长率也较高，但从总数量看，发展规模相对较小。

3.1.2 国内应用案例研究

我国从“九五”期间开始替代燃料车行动。1999 年，科技部、国家环保总局等十三部委局印发了《关于实施“空气净化工程—清洁汽车行动”的若干意见》的通知，其中提到行动的总体目标是降低机动车排放污染、净化空气；近期的主要技术措施为加快燃油汽车的清洁化进程和大力推广燃气汽车；中、长期措施为发展高新技术的低(零)排放车，如电动汽车、燃料电池车等。燃气汽车的示范城市和地区有北京、上海、天津、重庆、广州、西安、深圳、哈尔滨、乌鲁木齐、四川省川中地区、长春和海南省。到 2001 年 8 月底，这十二个城市和地区的燃气汽车发展情况如图 3-1 和图 3-2 中所示（全国清洁汽车行动协调领导小组办公室，2001）。

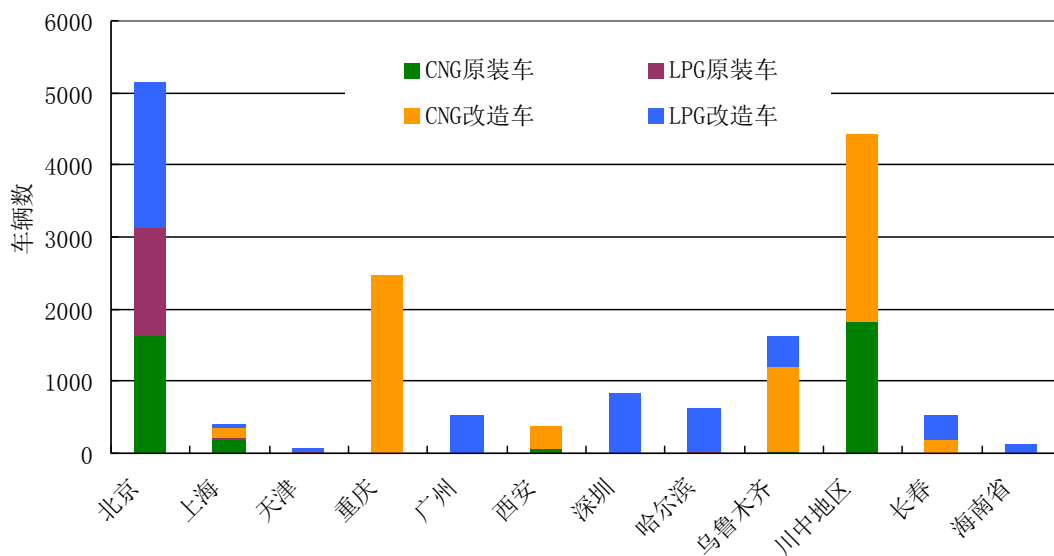


图 3-1 燃气汽车在十二个示范城市和地区公共汽车中的应用情况

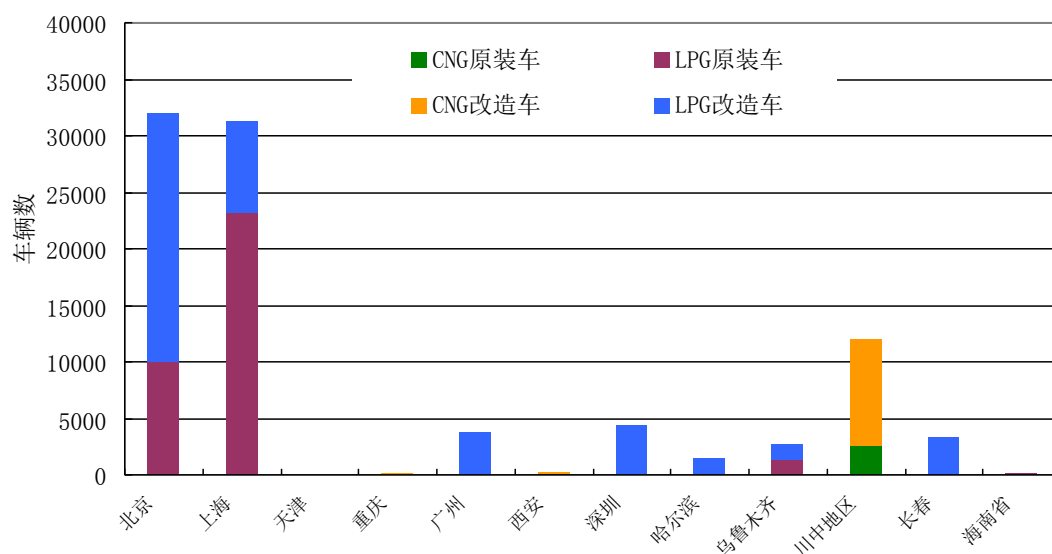


图 3-2 燃气汽车在十二个示范城市和地区出租车中的应用情况

行动初期阶段，开展的工作主要为燃油汽车的改造，将汽/柴油车改造为汽/柴油和 LPG/CNG 共用的双燃料车，试点城市有北京、上海、广州、四川省川中地区、哈尔滨和乌鲁木齐等，但从实施的情况来看，效果并不好。主要原因是汽/柴油专用发动机的最佳压缩比和气燃比与 LPG/CNG 不一样，发动机性能与燃料的不匹配导致效率降低，燃料燃烧不充分，CO 和 HC 等污染物排放甚至增加；另外，改装过程没有遵照一定的标准和规范，质量参差不齐，效果很难保证。全国清洁汽车行动协调领导小组办公室在 2000 年就其中出现的问题，又印发了《关于我国发展燃气汽车近期工作的若干要求》的通知，其中强调：“清洁汽车是指应用各种技术使汽车尾气排放指标优于现行排放法规，并能达到下一阶段排放法规要求的汽车，而不能简单地认为使用清洁能源的汽车就是清洁汽车”。

该通知中同时指出，在用车改装只是过渡阶段的工作，要求从 2000 年开始汽车生产厂直接生产在电喷技术基础上开发的双燃料和单一燃料燃气汽车，各试点示范城市更换新的燃气汽车，应订购由汽车生产厂直接生产的汽车，并由整车厂负责燃气汽车的维修服务。近几年，国内除了转向开发研制第三代技术的燃气汽车外，也从国外进口先进技术的单一燃气发动机。例如北京市在公交系统中引入装有美国 Cummins 公司生产的天然气发动机的单一天然气汽车，虽然一次性投资较大，但质量可靠性和污染排放削减效果

都较好。下面我们讨论的替代燃料车，除非特别注明，均为整车厂生产的原装（OEM）车辆，而不是改造车。

LPG 车在香港和台湾地区有较大的发展。香港政府对柴油出租车改装成使用 LPG 提供每辆车四万港币的补贴，并对进口 LPG 和低硫柴油减免关税，计划在 2005 年年底前，对全部的 1.8 万辆出租车和 6000 辆公共汽车完成改装。中国台北对购买 LPG 新车，汽油车改造为 LPG 车以及建造 LPG 加气站，都提供经济上的补贴。

总的来说，国内替代燃料车近几年有了较快的发展，但在排放特征上，还存在很多不确定的问题有待研究。比如，对使用不同燃料和不同技术的车辆在排放水平上进行比较准确的量化比较，实际运行工况下机动车的排放，以及各种车辆的排放对环境和人体健康的影响程度等等。

3.2 北京市燃气汽车发展现状

陕京天然气管道工程的投入使用和北京液化石油气市场逐步开放，为燃气汽车在北京的大力发展提供了气源保证。北京市发展替代燃料车起步于将传统汽油车改造为汽油—LPG 双燃料车，但车辆改造有较大的局限性，存在排放削减不明显，发动机与燃料性能不匹配等问题，导致实际使用的效果不好。因此，整车厂生产的原装车和单一燃料车成为发展替代燃料车的大势所趋。北京市从 1999 年开始，在公交系统中引入单一 CNG 汽车，这些公交车使用美国进口的 CNG 发动机，在国内的汽车制造厂装配成整车。根据技术的成熟程度和北京市的实际情况，目前全市在用的原装替代燃料车主要是 CNG、LPG 公交车和 LPG 出租车，也有十几辆的纯电动车在进行试用。截止到 2001 年底，全市已经建成燃气加气站 86 座，其中 LPG 加气站 62 座，CNG 加气站 24 座。汽油—LPG 双燃料出租车约为 3.2 万辆，使用 CNG 和 LPG 等替代燃料的公交车约 5000 辆。

公交车队中引入的单一 CNG 汽车，是国内基于美国康明斯 B5.9-195G CNG 单燃料发动机而开发研制的 BK6111 型公交车。在不使用尾气处理设备的情况下，其排放能达到美国环保局（Environmental Protection Agency, EPA）重型发动机排放标准。2001 年 8 月北京举办的第 21 届世界大学生运动会上，近 300 台装

备康明斯天然气发动机的客车成为大运会指定运输车。到 2002 年，北京已有 1900 多辆 CNG 单一燃料公交车在街头运行，成为世界上 CNG 公交车最多的城市。

LNG 汽车在北京也有初步的发展。2002 年底，公交 315 路停车场建成 LNG 加气站，相对于 CNG，它的建设地点不因安全问题影响而受到限制。2003 年底，第一辆 LNG 公交车在北京开始试用，这是 LNG 作为公交车燃料在亚洲国家首次投入应用。北京市也正积极在环卫车辆中推广 LNG 的应用，基于国家开始大规模从中东等地区进口 LNG 的行动，LNG 的成本将大幅降低，从而推动 LNG 的发展。

2003 年初，北京市出租车队中引入了 600 辆由北京现代汽车公司生产的 LPG 单一燃料出租车，其各方面性能表现良好，排放可达到当时刚刚实行的欧洲 2 号排放标准。但在成本上，它们要明显高于普通的出租车。

下面对北京市现有的各种燃气汽车进行排放状况的分析。

3.2.1 单一天然气公交车

到目前为止，北京市公交车队中的单一天然气汽车均安装美国 Cummins 公司制造的 B5.9-195G 型专用天然气发动机。根据美国能源部 1998 年发布的重型车和发动机资源指南，Cummins 公司生产的各型号专用 CNG/LNG 发动机都是在配备尾气净化装置后达到 EPA 超低排放车标准(ULEV)，LPG 发动机能达到 EPA 低排放车标准(LEV)，而 Cummins 公司的说明书中给出 CNG 发动机在不使用尾气净化设备时就能达到现行的 EPA/CARB 重型发动机排放标准。

Cummins 公司生产的主要型号代用燃料发动机排放如表 3—2 所示：

表 3-2 几个型号的代用燃料发动机特征及排放参数

发动机	类型	燃料类型	是否装催化设备	排放达标	NMHC	CO	NOx	PM	HCHO (ULEV)	排气量	马力	扭矩(ft-lb)
B5.9G	中型	CNG或LNG	是	EPA ULEV	0.1	2.6	1.8	0.02	0.024	359 CI, 5.9-L	150-230 @ 2800 rpm	375-500 @ 1600 rpm
B5.9 LPG	中型	LPG (HD-5)	是	EPA LEV	0.8 (THC)	1.0	2.3	0.01	N/A	359 CI,	195 @ 2800 rpm	420 @ 1600 rpm

										5.9-L		
C8.3G	重型 公交车	CNG或 LNG	是	EPA ULEV	0.3	0.6	1.7	0.01	0.013	505 CI, 8.3-L	250-275 @ 2400 rpm	660-750 @ 1400 rpm
C8.3G	重型 卡车	CNG或 LNG	是	EPA ULEV	0.6	0.9	1.8	0.02	0.025	505 CI, 8.3-L	250-275 @ 2400 rpm	660-750 @ 1400 rpm
L10G	重型 公交车	CNG或 LNG	是	EPA ULEV	0.1	4.1	1.4	0.02	0.014	611 CI, 10-L	280-300 @ 2100 rpm	900 @ 1300 rpm
L10G	重型 卡车	CNG或 LNG	是	EPA ULEV	0.1	4.6	1.6	0.02	0.013	611 CI, 10-L	280-300 @ 2100 rpm	900 @ 1300 rpm

注：排放的单位均为g/bhp-hr

从上表可以看出，在装有尾气催化转化设备后：

- PM 排放：各型号发动机都很低，在 0.01~0.02g/bhp-hr 之间；
- NO_x 排放：B5.9G 型 CNG/LNG 发动机和 C8.3G 型、L10G 型差不多，在 1.4~1.8 g/bhp-hr 之间，而 B5.9G 型 LPG 发动机偏高，为 2.3 g/bhp-hr；
- NMHC 排放：用于重型卡车的 C8.3G 型 CNG/LNG 发动机偏高，为 0.6 g/bhp-hr，而 B5.9G 型 LPG 发动机的 THC 排放为 0.8g/bhp-hr；其它型号发动机的排放在 0.1~0.3 g/bhp-hr 之间；
- CO 排放：B5.9G 型 LPG 发动机和 C8.3G 型 CNG/LNG 发动机排放较低，在 0.6~1.0 g/bhp-hr 之间，B5.9G 型 CNG/LNG 发动机偏高，为 2.6g/bhp-hr，L10G 型 CNG/LNG 发动机较高，在 4.1~4.6 g/bhp-hr 之间；
- HCHO 排放：用于重型公交车的 C8.3G 型和 L10 型 CNG/LNG 发动机排放较低，在 0.013~0.014 g/bhp-hr 之间，而用于重型卡车的 C8.3G 型和 B5.9G 型 CNG/LNG 发动机偏高，在 0.024~0.025 g/bhp-hr 之间，B5.9G 型 LPG 发动机缺乏数据。

北京市引入的 B5.9-195G 型 CNG 发动机除了在 CO 和 HCHO 的排放上比其它稍高外，各项常规污染物排放都是很低的。

表 3-2 中是发动机的型式认证数据，和实际运行中的排放情况有差别。美国

的燃气公交车和卡车中，多采用 Cummins L10G 型和 C8.3G 型发动机或是 DDC Series 50G 发动机，已经进行的排放测试实验都是关于上述类型发动机的。例如，由美国能源部资助，西弗吉利亚大学在全美各地对 77 辆采用 Cummins CNG 专用发动机的公交车进行了 405 次的排放台架测试实验，实验采用 CBD 驾驶循环，该循环如图 3-3 所示，反映了城市公交车的运行特征参数。测试车辆的行驶里程最高为 175400km，最低为 4500km。

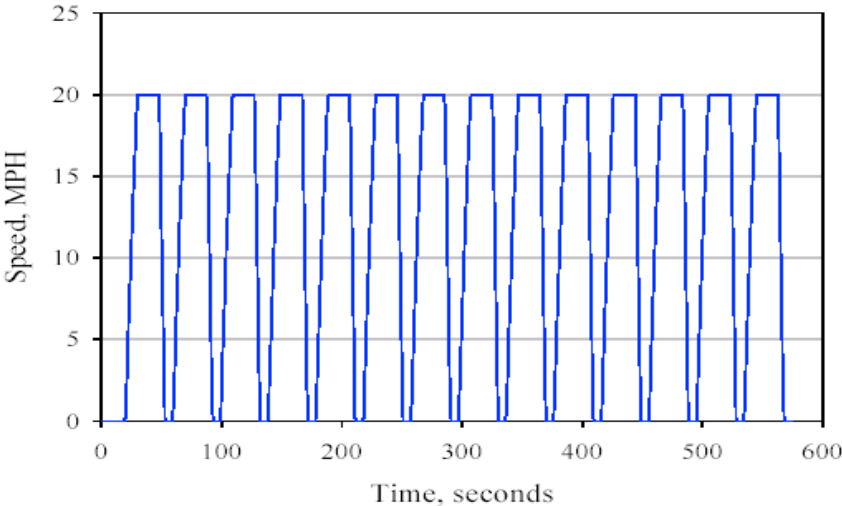


图 3-3 CBD 驾驶循环

在利用这些数据计算北京市燃气公交车的排放因子时，应做一定的取舍和换算。其中考虑的几个因素有：

- 不同型号发动机的特征参数：如 B5.9-195G 和 L10-280G 发动机相比，前者的额定功率为后者的 70%，排气量之比为 0.59，而额定转速之比为 4/3；
- 不同型号发动机的排放水平：根据表 1 中的数据，各型号发动机在型式认证中的污染物排放水平除 CO 和 NMHC 的个别数据外，基本处于同一水平；在没有更多测试数据支持的情况下，可以认为上述类型的发动机在使用过程中的单位功率排放水平相当。因此，可从应用 C8.3G 型和 L10G 型发动机的车辆排放数据推算 B5.9G 型的排放。需要注意的是，发动机的实际功率和车辆排放密切相关，它与额定功率是有区别的，前者取决于实际的使用条件，考虑到同一型号而不同额定功率的发动机常被用于同类车辆上，所以用排气量*额定转速的比值来进行换算比用额定功率更合理一些。
- 燃料喷射系统：空燃比对排放的影响非常大；是否具有高性能的燃料喷射

系统，会导致发动机排放的很大差别。如测试实验中部分采用 L10-240G 发动机的公交车，无闭环反馈电子喷射系统，和应用了该系统，采用 L10-280G 发动机的公交车相比，CO 排放相差很大。B5.9-195G 型发动机采用闭环反馈电子喷射系统，和 C8.3-250G、L10-280G 型发动机是一样的。

- 是否安装尾气净化装置：安装一般的尾气净化设备，如三元催化转化器，对降低 HC、CO 和 NO_x 等都有明显效果；根据表 1-4，B5.9-195G 型发动机在配用尾气净化设备后能达到美国 EPA 的超低排放车标准；而在 Cummins 公司给出的说明书中，该发动机在不使用尾气净化设备时就能达到 CARB/EPA 的重型发动机排放标准，北京市现在使用的燃气公交车基本上是未装催化转化设备的；考虑到对 C8.3-250G 型发动机进行的排放测试实验中，当时的车辆也未安装催化转化设备，因而是有可比性的；而 L10-260G、L10-280G 型发动机，有些配备尾气净化装置，有些则没有，缺乏确定说明，故暂不应用此型号发动机的车辆测试数据。
- 燃料质量：使用的天然气质量对排放影响也很大。Cummins 公司对其发动机使用的天然气有推荐的标准，具体技术指标见第五章。北京市车用天然气的成分指标大部分能满足 Cummins 公司推荐的标准，但总硫分的含量可能偏高，这会对尾气净化设备造成影响，而导致车辆排放增加。

西弗吉利亚大学对 24 辆安装 C8.3-250G 型 CNG 发动机的公交车进行的 119 次排放测试实验，都是在加州进行的，其结果中 PM 排放比其它对 L10G 型发动机进行的排放测试高一倍左右，考虑燃料品质的影响，在用这些数据估算目前北京市专用 CNG 公交车的排放因子时，对 PM 不再做调整。结果如表 3-3 所示，同时给出了模型计算得到 2002 年北京市重型汽、柴油车的平均排放因子。

表 3-3 北京市单一 CNG 公交车和重型汽、柴油车的平均排放因子
(2002 年) / g·km⁻¹

	HC	CO	NO _x	PM
单一 CNG 公交车	6.19	5.32	4.69	0.053
重型汽油车	4.93	60.59	4.85	0.141
重型柴油车	2.77	9.66	15.23	0.930

注：由于 C8.3G 型发动机的公交车测试实验中没有 HC 的排放数据，HC 排放因子是由 L10G

型发动机的公交车测试实验数据推算得到的。

3.2.2 改造汽油—LPG 双燃料车

对于汽油车改装为汽油—LPG 双燃料车，由于发动机性能和燃料不匹配的原因，现在大多数人都认识到它们在动力性能上常常会出现下降。北京市对 2.2 万辆出租汽车进行的改造，收效很低，调查表明大部分司机不愿意使用 LPG。在减少排放的效果上，改造车辆也较差，甚至有时会增加排放。有研究人员曾对墨西哥城使用的改造 LPG 车进行了台架排放测试。到 2000 年，墨西哥城有 28000 辆轻型车和重型卡车使用 LPG，其中大部分为在用车改造技术。对具有代表性的 134 辆改造 LPG 车样本进行测试的结果，CO、HC 和 NO_x 的排放比预期的高很多，远远超过了标准限值；对 87 辆发动机进行调整，并在实验室通过认证的 LPG 车再进行测试的结果，三种污染物的排放能够达标，具体结果如表 3-4 所示：

表 3-4 墨西哥城改造 LPG 车的平均排放因子 / g·km⁻¹

	CO	HC	NO _x
134 辆未经认证的改造 LPG 车样本	20.05	1.99	3.23
87 辆认证的改造 LPG 车	2.13	0.23	0.74
排放标准	6	0.4	1.2

尽管 87 辆经过发动机调整，并通过实验室认证的改造 LPG 车排放相比原来有了很大程度的降低，但北京对在用车进行改造时，基本都没有经过实验室认证，改造质量难以保证，类似墨西哥城车辆改造的普通情况。

表 3-5 中给出美国西南研究所对汽油车改造为 LPG 车的一项研究结果，采用三种不同的改装件，观察改装后的车辆排放和原始车辆的差别。不难看出，虽然不同的改装件会导致排放的不同变化，但总体排放水平差不多。当 CO 和 HC 排放减小时，NO_x 排放增加了；甚至三种污染物的排放都出现了增加。

表 3-5 汽油车和采用不同改装件的 LPG 车的排放比较

燃料	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)
汽油	5.40	0.37	0.42
LPG改装件1	1.90	0.33	1.62
LPG改装件2	10.23	0.57	0.57

LPG改装件3	2.55	0.21	0.67
---------	------	------	------

美国环保局的研究报告中也给出了同样的结论。图 3-4 中是美国 1990 年左右的几种轻型汽油车在改造前和改造为 LPG 车后的排放比较，不难看出，车辆在改造前和改造后的整体排放水平差不多。

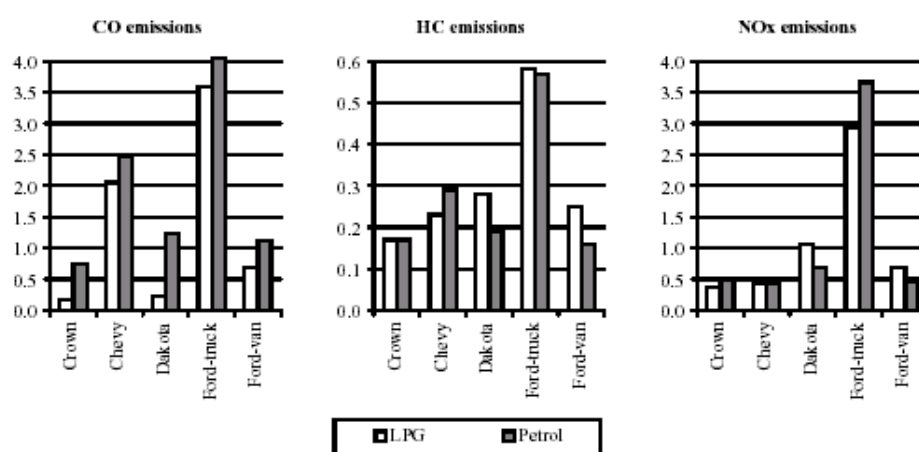


图 3-4 轻型汽油车改造前和改造为 LPG 车后的排放比较（单位：g/km）

综上所述，有理由认为北京市出租车改装成 LPG—汽油双燃料车在 CO、HC 和 NOx 排放上基本没有变化；而对于 PM，由于轻型汽油车的 PM 排放本身就很低，估算得到的 2002 年北京市轿车 PM 排放因子为 0.018g/km，可认为轻型汽油车的改造对 PM 排放也不会有明显减少。对于公交车改造成汽油—LPG 双燃料车，因为数量不多（不到 800 辆），根据从公交公司得到的信息，车辆改造时在实验室做过简单的测试，改造后的排放只比改造前稍有降低，离达到欧洲 1 号标准尚有很大差别，在实际使用的过程中也很难保证改造的质量，因此不考虑其在排放削减上的作用。

综上所述，对于排放控制水平低的车辆来说，规范合理的改造可以取得比较明显的效果。对于北京市而言，由于从 1999 年开始实施欧洲 1 号排放标准，新车都已经采用电喷加三元催化转化技术，现在机动车排放控制已进入第二阶段，从排放削减的角度看，车辆改造不会再有太大的作用。对全国而言，部分地区机动车排放控制水平还比较低，可以考虑车辆改造；另一方面，能源结构

调整也是使用替代燃料的一个重要原因。但需要注意的是，车辆改造必须按照规范要求进行，改造后的车辆也要通过认证才能上路行驶。例如，美国环保局就颁布了车辆改造为替代燃料车的认证指南。

3.2.3 原产汽油－LPG 双燃料车

北京公交总公司在 1999 年投入了国内自行研制开发的汽油－LPG 双燃料车近 2000 辆，它们在排放上虽然比改造车效果好一些，但仍达不到当时工况法测试的标准要求。而且在实际使用过程中，原产双燃料车同样面临发动机性能无法达到最佳状态的问题，经常转换燃料导致车辆排放比仅使用其中任一种燃料都要高。在出租车方面，北京市引入了 10000 辆的原产汽油-LPG 出租车（生产商有捷达等），和上述情况类似，很多司机平时仅使用汽油。

美国能源部 NREL 对福特公司生产的 F250 汽油－LPG 双燃料车进行排放测试的结果表明，使用 LPG 并不比使用汽油的排放低，见图 3-5。因此，对于同等技术的汽油车和汽油－LPG 双燃料车，从排放削减的角度考虑，不推荐使用双燃料车。如果要考虑能源结构调整，也应首先选择单一燃料的替代燃料车。

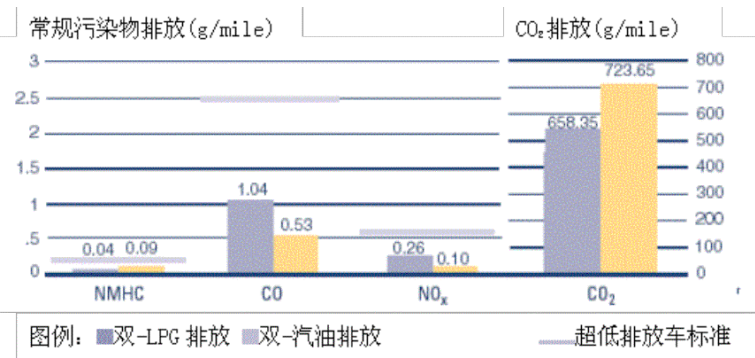


图 3-5 Ford F-250 LPG-汽油双燃料车的排放测试结果

用模型计算得到北京市 1999 年登记的轿车和重型汽油车在 2002 年的平均排放因子，考虑原产双燃料车在燃烧状况上略差于原产汽油车，由不同空燃比下汽油机污染物的排放曲线（郝吉明，2001）对上述排放因子进行调整，估算结果如表 3-6 所示。

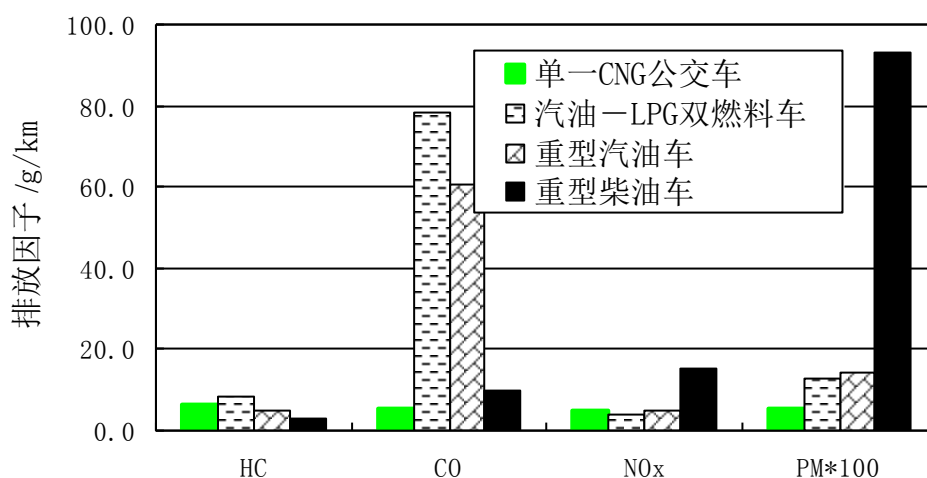
表 3-6 北京市原产汽油－LPG 双燃料车排放因子（2002 年） / g·km⁻¹

	HC	CO	NOx	PM
--	----	----	-----	----

公交车	8.15	78.21	3.87	0.128
出租车	2.70	21.90	1.78	0.024

将 2002 年北京市重型汽、柴油车和单一 CNG、原产汽油—LPG 双燃料公交车的平均排放因子进行比较，见图 3-6。

从图 3-6 中可以看出，单一 CNG 公交车在 PM 的排放上显著低于重型柴油车，亦不到重型汽油车的 1/2；CO 排放明显低于汽油—LPG 双燃料车和重型汽油车，亦不到重型柴油车的 60%；HC 排放稍高于重型汽、柴油车（但其中 90%



以上的成分为甲烷，甲烷不是臭氧前体物，但是重要的温室气体）；NOx 排放和重型汽油车差不多，不到重型柴油车的 1/3。原产汽油—LPG 双燃料公交车在气态污染物排放上相比重型汽油车没有改善，HC 和 CO 排放反而增加，PM 排放则略有减少。

图 3-6 2002 年北京市重型车平均排放因子比较

3.3 北京市机动车排放和污染现状

发展方案的制定必须以现状为依据。为提出合理可行的北京市燃气汽车发展规划，本节将先给出北京市机动车排放和污染现状，然后对目标年机动车发展和排放趋势作出预测；在此基础上，根据目前比较可行的燃气汽车技术和已有的费用效果分析结果，结合对各种技术的发展前景展望，选择适合北京市发展的车型，提出合理有据的北京市燃气汽车发展方案。

本研究计算得到基准年（2000 年）北京市各类机动车的排放因子，然后结

合车辆的活动水平，给出机动车的排放清单。在这个基础上，再根据当年北京市各种常规污染物的排放总量及其时空分布、全年的空气质量数据和污染物的本底浓度等，利用空气质量模型模拟，可以得到机动车排放对北京市空气质量的影响；但后面这部分研究工作量很大，而且不是本研究的侧重点，因此这里引用研究专著《城市机动车排放污染控制》（郝吉明等，2001）和国家科技专项《北京市大气污染综合防治对策研究》（清华大学，2002）中的结果。

本研究依据 2000 年北京市不同类型机动车的保有量和运营状况，以及当时北京市机动车的排放控制水平和环境参数等，分别应用 MOBILE5 模型和 PART5 模型计算气态污染物排放因子和颗粒物排放因子。MOBILE5 与 PART5 分别为美国环保局开发的计算道路机动车气态污染物和颗粒物排放因子的数学模型，基本计算公式是根据 EPA 开展的机动车排放测试（FTP 工况），对测试数据进行长期的统计和回归分析后得到的经验公式，两者的方法基本一致。

3.3.1 MOBILE5 模型原理与计算方法

MOBILE5 模式的计算思路是首先根据排放控制水平得到机动车在标准工况下的基本排放因子，在此基础上根据实际条件下各影响因素同标准工况的差别对基本排放因子进行修正，最终得到实际运行状况下的排放因子。由于被测机动车在车型、排放控制措施、发动机结构、变速器类型、燃料喷射系统、维修保养状况以及行驶里程等方面各不相同，因而测试结果对全体车辆的排放状况有相当的代表性。模式将机动车分为八类进行计算：

轻型汽油机车辆(LDGV——Light Duty Gasoline Vehicles)

轻型汽油机卡车(LDGT——Light Duty Gasoline Trucks)

重型汽油机车辆(HDGV——Heavy Duty Gasoline Vehicles)

轻型柴油机车辆(LDDV——Light Duty Diesel Vehicles)

轻型柴油机卡车(LDDT——Light Duty Diesel Trucks)

重型柴油机车辆(HDDV——Heavy Duty Diesel Vehicles)

摩托车(MC——Motorcycles)

对于 LDGT, MOBILE5 按其总重量(GVW, Gross Vehicle Weight)又分为两类, LDGT1($GVW \leq 2700\text{kg}$)和 LDGT2($2,700\text{kg} < GVW \leq 3900\text{kg}$)。对于特定地区, 将当地的机动车运营工况、行驶里程分布以及其它因素(如气象条件、燃料使用)等数据按给定格式输入模型并运行计算模式, 可得到某年的排放因子。

MOBILE5 基本排放因子的计算基于美国 FTP 测试工况, 即模拟的基本排放因子相当于在 FTP 工况下测试的结果。该工况是美国联邦用于测试机动车污染物排放的标准工况。工况循环时间 2475 秒, 包括冷热启动和稳定行驶过程, 平均车速 31.4km/h, 包含了加、减、怠、匀速等各工况, 污染物分 3 阶段取样。

基本排放因子的计算假设同一年代或采用相同控制技术生产的车辆, 排放水平相似, 且基本排放因子随行驶里程的增加线性劣化, 劣化曲线的截距和斜率分别为车辆零公里排放水平(ZML)和劣化率(DR)。

对于总行驶里程大于 8 万公里的 LDGV 和 1991 年以后生产, 总行驶里程大于 8 万公里的 LDGT, 分两阶段模拟其排放劣化, 即:

$$\text{BEF} = \text{ZML} + \text{DR1} \times 8 + \text{DR2} \times (\text{MC} - 8) \quad (3-1)$$

对于其它车型, 则:

$$\text{BEF} = \text{ZML} + \text{DR} \times \text{MC} \quad (3-2)$$

其中 BEF 为基本排放因子(g/km); ZML 为零公里排放水平(g/km); DR1 与 DR2 分别为一阶段和二阶段劣化率($\text{g/km} \cdot 10^4\text{km}$); MC 为实际总行驶里程(10^4km)。

MOBILE5 根据 EPA 大量机动车排放测试的结果, 回归出对应于不同技术年代、不同污染物和不同车型的可用于上述公式计算的参数, 这些参数构成了 MOBILE5 模式的基础。由于基本排放因子是在标准工况下测试的结果, 排除了背景条件、运行工况、油品等各种因素的差别, 因此它们之间具有可比性, 其差异是机动车排放控制技术水平的集中反映。

除了因机动车排放控制水平不同造成的基本排放因子的差异，环境因素、运行状况、燃料品质、车辆维护情况均对机动车的实际排放造成影响。MOBILE5 模式根据大量试验测试的结果，回归得到计算各种影响因素的经验公式和经验参数。

MOBILE5 认为，计算给定年份某车型的排放因子是全部在用车辆的排放因子按照行驶里程加权平均的结果。先计算某车型在一定车龄时的排放因子 EF_{by}：

$$EF_{by} = (BEF + B_T - B_{IM}) \times Cr \times Co \times Cs \times Ca \quad (3-3)$$

其中 B_T 为部件损坏造成的排放增加； B_{IM} 为 I/M 制度带来的排放削减； Cr 为燃料饱和蒸汽压修正因子； Co 为温度工况联合修正因子； Cs 为速度修正因子； Ca 为空调、拖车、超载以及湿度的综合修正因子。

然后根据给定年份该车型的车龄分布和年均累积行驶里程，对各车龄车辆的 EF_{by} 进行加权平均，就得到该车型的排放因子。实际道路上车辆的平均排放因子根据各车型年均行驶里程加权平均。

3.3.2 PART5 模型原理与计算方法

PART5 模式基本思路与 MOBILE5 类似，根据发动机的类型以及车辆的重量将机动车分为 12 类，对不同类型的车辆分别考虑油品质量、车速、维修保养状况等各种因素对排放的影响，并从这些数据的测试分析中获得各年、各车型车辆排放因子的平均水平，以及颗粒物中各重要化学组分(铅、硫酸盐、可溶性有机物和残余碳等)的组成比例。

对每类机动车，其综合排放因子的基本计算公式通过式(3-4)计算

$$EF_{COMPv} = \sum_{m=1}^{25} EF_{m,v} \cdot TF_{m,v} \quad (3-4)$$

其中 EF_{COMPv} 为 v 类机动车的综合排放因子(g/km)；EF_{m,v} 为车龄 m 年的 v 类机动车的排放因子(g/km)；TF_{m,v} 为车龄 m 年的 v 类机动车的行驶里程在该类机动车总行驶里程中所占的比例。影响 EF_{m,v} 的因素很多，模式通过测试的

结果，回归出经验公式进行计算。其表达式可以由包含下述各项参数的回归方程表述：

$$EF_{m,v} = f(V, Cs, Cpb, FQ, FE, PS, CA, IM) \quad (3-5)$$

其中 V 为速度修正参数；Cs 为油品的含硫量参数；Cpb 为油品的含铅量参数；FQ 为油品的其它影响参数；FE 为燃油经济性参数；PS 为颗粒物的粒径分布参数；CA 为机动车安装催化转化装置的比例参数；IM 为机动车维修保养状况影响参数。

PART5 根据美国的实际情况，确定了机动车控制技术水平、行驶里程、车辆登记分布、油品质量等参数值。因此，当模式应用于北京时，必须根据本市机动车的实际情况对相关参数进行调整，以保证计算结果的可信度。

3.3.3 北京市 2000 年机动车排放清单的建立

根据北京市机动车的实际情况，将其划分为 LDGV、LDGT1、LDGT2、HDGV、HDDV、MC 六种类型（相比 MOBILE5 里的划分少了 LDDV 和 LDDT 两种类型，北京市的在用机动车里几乎没有这两种车型，因此不考虑），分别利用 MOBILE5b 和 PART5 计算得到 2000 年气态污染物和颗粒物机动车排放因子，如下表所示：

表 3-7 北京市 2000 年机动车排放因子（单位：g/km）

污染物	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC
HC	2.96	4.83	7.66	6.98	3.55	6.23
CO	24.53	37.67	53.50	82.56	11.13	18.08
NOx	1.80	2.08	3.87	4.44	18.77	0.08
尾气管排放 PM10	0.022	0.030	0.064	0.141	0.930	0.016

污染物排放量 Q_i 基于以下公式建立：

$$Q_i = \sum A \times EF_i \times (1 - \eta) \quad (3-6)$$

其中 A 为机动车活动水平， EF_i 为第 i 种污染物排放因子， η 为排放因子削减比例。机动车活动水平具体表现为年均行驶里程，由该车型不同车龄车辆的年均行驶里程与该车龄车辆数乘积的加和得到：

$$A_j = \sum_{t=0}^{14} l_{jt} \cdot C_{jt} \tag{3-7}$$

其中， l_{jt} 为第 j 类车中车龄为 t 年车辆的年均行驶里程， C_{jt} 为第 j 类车中车龄为 t 年的车辆数。

根据(3-6)式计算 2000 年北京市各类车型污染物的排放量，结果见表 3-8：

表 3-8 北京市 2000 年机动车分车型排放量（单位：吨）

	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC	总和
HC	36564	25944	43638	7625	4459	10435	128666
CO	303150	202360	304760	90179	13986	30276	944712
NOx	22276	11152	22040	4854	23594	141	84058
PM10*	272	161	365	154	1169	27	2148

*：尾气管排放量

各车型污染物排放的分担率如图 3-7 所示：

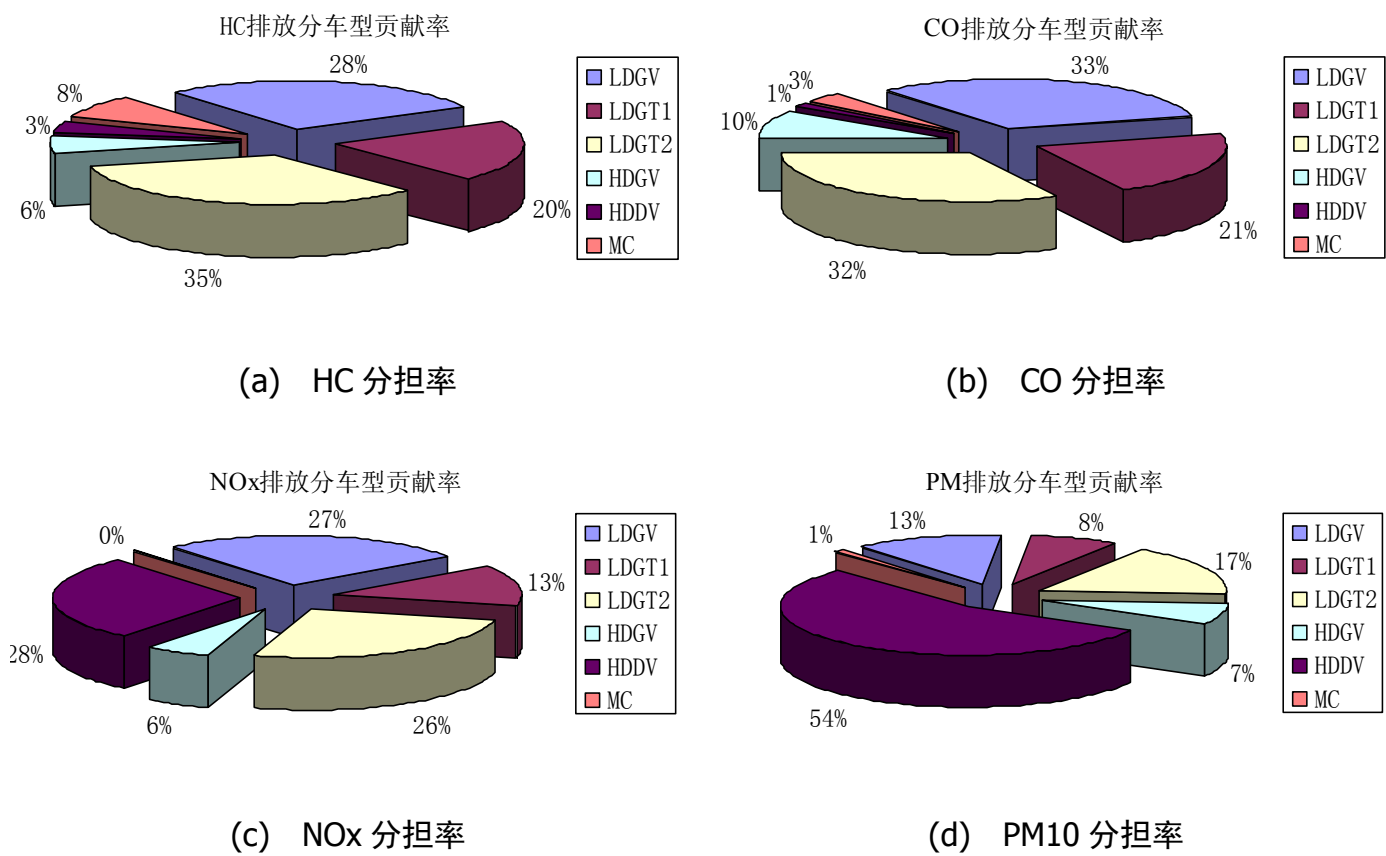


图 3—7 北京市 2000 年机动车排放分车型分担率

从图上可以看到：

- LDGT2、LDGV 和 LDGT1 依次为 HC 和 CO 排放最主要的贡献者，它们排放的总和分别占到了机动车 HC 总排放的 83%和 CO 总排放的 86%。从控制 HC 和 CO 排放的角度考虑，轻型车是绝对的重点。另外，MC 对 HC 总排放有 8%的分担率，也需要加以一定的控制。
- LDGV、LDGT2 和 HDDV 依次是 NO_x 排放的最主要贡献者，三者排放的总和占到机动车 NO_x 总排放的 81%。从保有量上看，LDGV 和 LDGT2 分别约为 HDDV 的 7 倍和 3.5 倍，因此从控制 NO_x 排放的角度考虑，除加大轻型车排放控制的力度外，控制重型柴油车排放也能取得比较明显的成效。
- HDDV 对 PM₁₀ 排放的贡献是最显著的，分担率超过了 50%；其次是 LDGT2 和 LDGV，分担率分别达到 17%和 13%，三者排放的总和占到机动车 PM₁₀ 总排放的 84%。控制机动车 PM₁₀ 排放，重型柴油车是绝对的重点，其次是小货车和小客车。轿车的排放也需要进行一定程度的控制。另外，HDGV 对 PM₁₀ 总排放虽然只有 7%的分担率，由于其保有量小（LDGV、LDGT1 和 LDGT2 分别约为 HDGV 的 7.8 倍、4.5 倍和 3.8 倍），所以控制重型汽油车的排放也能取得比较明显的成效。

出租车和公交车的排放经常受到公众的关注，因为它们中的大部分是在城市中心人口密度大的地区，同时，高的年均行驶里程导致车辆排放劣化较快，在交通拥堵地区行驶的怠速工况比例较大，这些都导致了出租车和公交车的单车高排放，对大气环境和公众健康造成了直接和间接的影响。本研究对这两种车的排放也单独进行了估算，其 2000 年的排放状况见表 3—9。

表 3—9 2000 年北京市公交车和出租车的排放

	保有量（辆 ）			HC	CO	NOx	PM10*
出租 车	62613	排放因子(g/km)		3. 19	28. 63	2. 01	0. 020
		排放量（吨）		19963	179278	12608	125
		占总排放比例		15. 5%	19. 0%	15. 0%	5. 8%
公交 车	9725	排放因子 (g/km)	汽油车	9. 44	133. 33	5. 54	0. 151
			柴油车	5. 84	18. 14	29. 49	0. 967
		排放量（吨）		4202	44204	8598	273
		占总排放比例		3. 3%	4. 7%	10. 2%	12. 7%

*：尾气管排放量

3.3.4 北京市 2000 年大气质量状况

由北京市 2000 年环境质量公报，得到 2000 年市区范围内主要大气污染物的浓度。根据《城市机动车排放污染控制》一书和《北京市大气污染综合防治对策研究》报告中给出的结果，可以得到北京市机动车排放对大气污染物浓度的分担率，由此大致得出机动车排放量对空气质量的影响。具体结果如表 3-10 所示：

表 3-10 北京市 2000 年机动车排放与空气质量

污染物	市区浓度年日均值 (mg/m ³)	机动车排放量 (t)	机动车排放贡献的浓度 (mg/m ³)	机动车排放的浓度分担率 (%)
CO	2.70	944712	2.07	76.50
NOx	0.129	84058	0.088	68.18
PM10	0.162	2148*	0.017	10.27

*：尾气管排放量

根据上表数据，采用等比例法估算机动车排放对空气质量的影响，影响因子分别为：

- CO: 0.022mg/(m³·10⁴t)
- NOx: 0.010mg/(m³·10⁴t)
- PM10: 0.079mg/(m³·10⁴t)。

3.4 北京市机动车发展和排放量预测

未来北京市机动车的增长速度和发展趋势是制定替代燃料车发展方案的重要依据。机动车保有量决定了替代燃料车发展的规模，而各车型的比例对替代燃料车应用的领域有很大影响。因此，北京市机动车发展预测主要包括机动车总保有量和分车型保有量预测两方面。

3.4.1 未来 20 年北京市机动车保有量预测

根据 Joyce Dargay 和 Dermot Gately 的观点，一个国家或地区人均机动车保有水平与人均 GDP 有较大关系，图 3-8 给出了不同经济发展水平国家两者关系

的变化趋势。已有的数据表明，总体上人均机动车保有量随人均 GDP 呈 S 型曲线增长，增长速度先逐渐加快，到达一个最高速度后逐渐减小，最终人均保有量趋于饱和，这个长期变化可以用 Gompertz 曲线表达。通过数学建模，得到两者关系满足如下递推公式：

$$C_{it} = \theta \{ \gamma \exp[\alpha_i \exp(\beta GDP_{it})] \} + (1 - \theta) C_{it-1} \quad (3-8)$$

其中 C_{it} 表示地区 i 第 t 时间段人均机动车保有量； θ 为调节速率，反映收入增长对机动车保有水平的影响周期，对 20 年左右的时间段一般取为 0.09； γ 为地区人均机动车保有量饱和值，发达国家一般取 0.85，而亚洲人口稠密的城市（如汉城、香港等）取为 0.29； α_i, β 为反映 Gompertz 曲线形状的参数，可通过对已有数据的拟合得到。

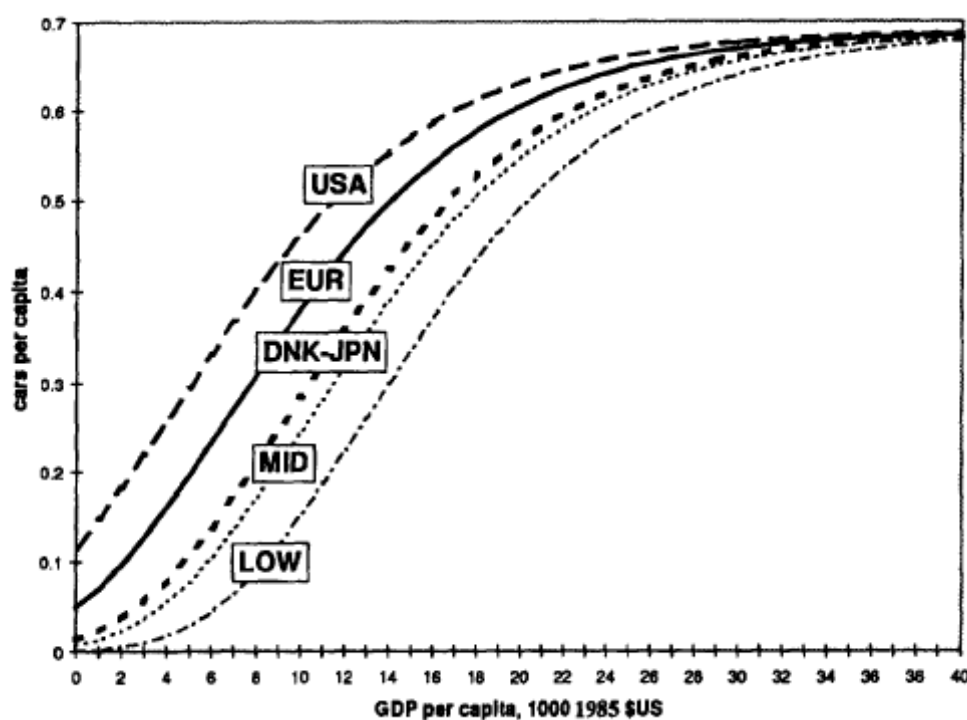


图 3-8 人均机动车保有量与人均 GDP 关系图

图 3-9 与 3-10 分别给出 1989~2000 年北京市人均 GDP 增长和机动车人均保有量增长变化，假设两者关系满足(3-22)式。对数据进行指数回归，得到这段时间内北京市人均 GDP 的平均增长速率为 17.1%，机动车人均保有量的平均增长速率为 15.1%，都处于非常高的增长水平。

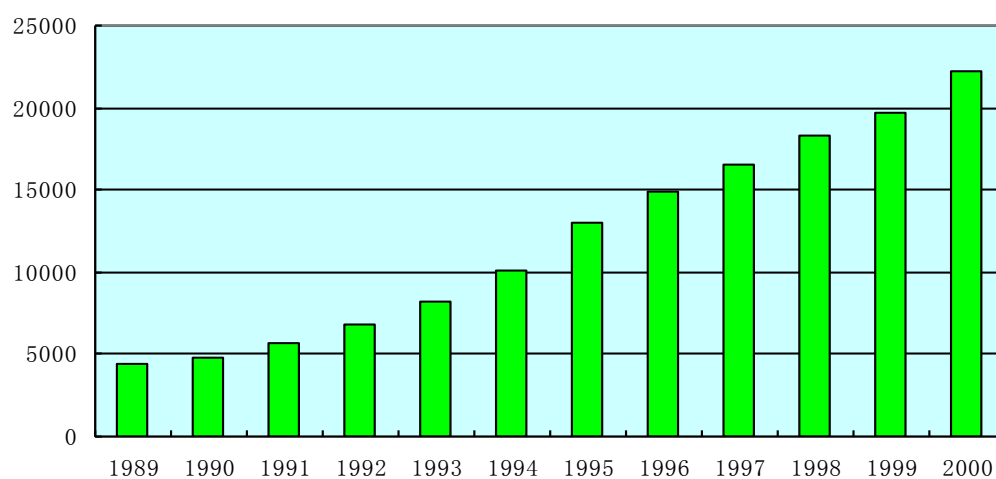


图 3-9 北京市 1989~2000 年人均 GDP 变化（单位：元）

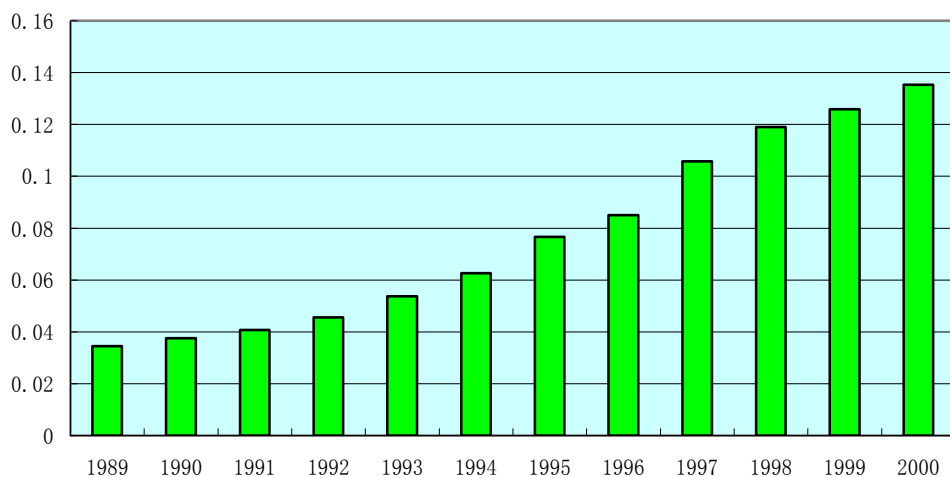


图 3-10 北京市 1989~2000 年人均机动车保有量变化 (单位: 辆/人)

对(3-8)式中各参数, θ 按 20 年影响周期考虑取为 0.09, 人均机动车保有量饱和值 γ 与人口密度和生活习惯有比较密切的关系, 参考发达国家各大城市的数据 (特别是纽约和东京), 并考虑北京市的实际情况, 取为 0.45。利用 OriginPro7.0 软件进行模拟, 得到 $\alpha_i = -8.16$, $\beta = -3.09$ 。

将 1990—2000 年人均机动车保有量实际值和模型计算值进行比较, 得到图 3-11 的相关性验证, 拟合的相关系数 r 为 0.994, 模型模拟与统计值符合程度较高。

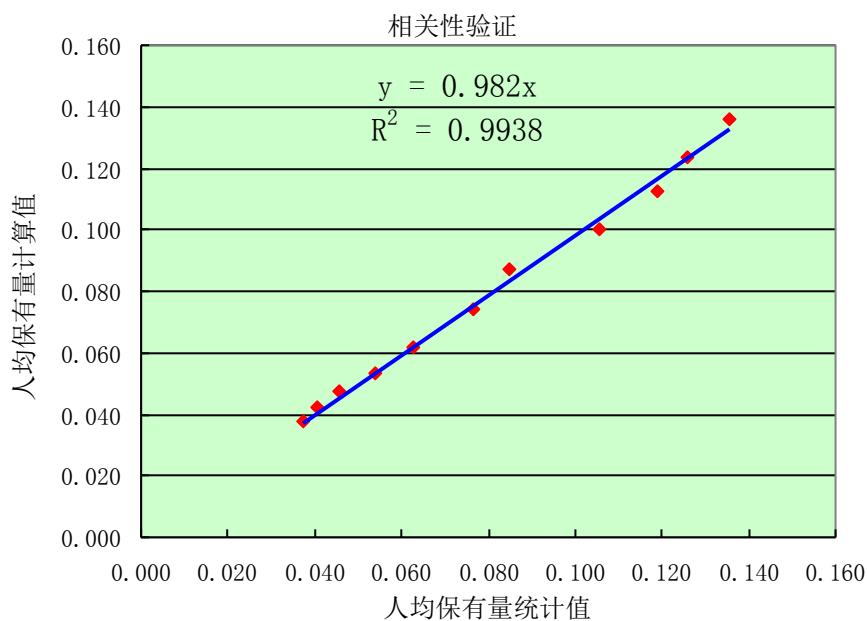


图 3-11 模型相关性验证

研究中使用的北京市 2003~2008 年 GDP 预测数据来源于市政府奥运经济发展战略规划，2009 年以后则按每年 7% 的速度递增至 2020 年(均扣除物价因素)。未来人口根据北京市本地人口持续缓慢增长，但增长速度逐渐减小，外来人口增加数量逐年下降的原则进行估计。由此估算得到北京市人均 GDP 增长趋势，根据 GDP 价格指数将人均 GDP 统一折合成 1990 年的水平，结合由统计数据得到的 Gompertz 函数，预测未来 20 年北京市机动车总保有量。基准年(2000 年)数据和目标年(2008 年，2020 年)预测结果如表 3-11 所示。

表 3-11 北京市机动车保有量预测结果

年份	人口(万)	GDP (亿元)	人均 GDP (元)	人均保有量(辆)	总保有量 (万辆)
2000	1113.5	2479	22261	0.135	150.7
2008	1182.9	6033	50999	0.275	325.1
2020	1268.8	13587	107084	0.393	498.6

注：2008 和 2020 年 GDP 为扣除物价因素后，折合成 2000 年的水平

机动车总保有量增长趋势如图 3-12 所示，S 型曲线拐点在 2005 年前后出现，说明目前阶段是北京市机动车增长最快的时期，而 2010 年以后机动车增长速度将出现明显的下降。

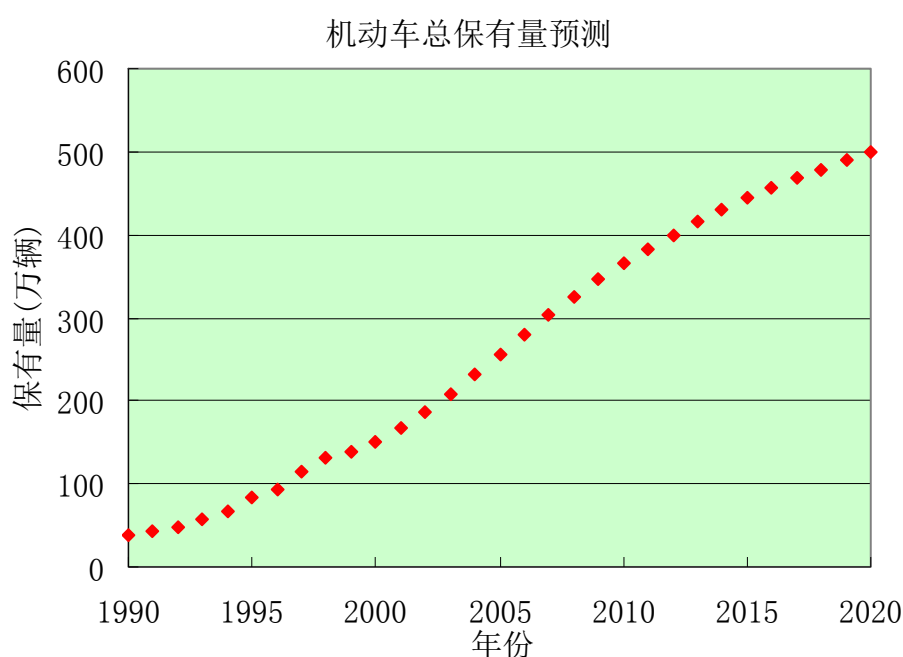


图 3-12 北京市机动车总保有量预测

3.4.2 北京市机动车分车型保有量预测

机动车分车型保有量预测是依据不同类型的机动车在北京的应用现状和需求情况，分阶段选取增长速率或增长量估算得到。

在总保有量预测的基础上，对除 LDGV 外的车型采取分段线性递增的方法估算其保有量，而 LDGV 保有量的增长则采用改变参数值后的(3-22)式模拟结果作为参考，并加以修正。得到的北京市目标年机动车分车型保有量预测结果如表 3—12 所示。

表 3-12 北京市机动车分车型保有量预测结果（单位：万辆）

年份		LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC
2008	保有量	159.9	60.9	33.3	8.1	8.8	54.2
	所占比例（%）	49.2	18.7	10.2	2.5	2.7	16.7
2020	保有量	267.4	81.4	38.9	10.5	14.2	86.2
	所占比例（%）	53.6	16.3	7.8	2.1	2.9	17.3

各车型保有量的增长趋势如图 3—13 所示。其中，LDGV 保有量的增长最为显著，和机动车总保有量的增长趋势类似；LDGT1 和 MC 的保有量也有一定程度的增长，而其它几种车型的增长都不明显。

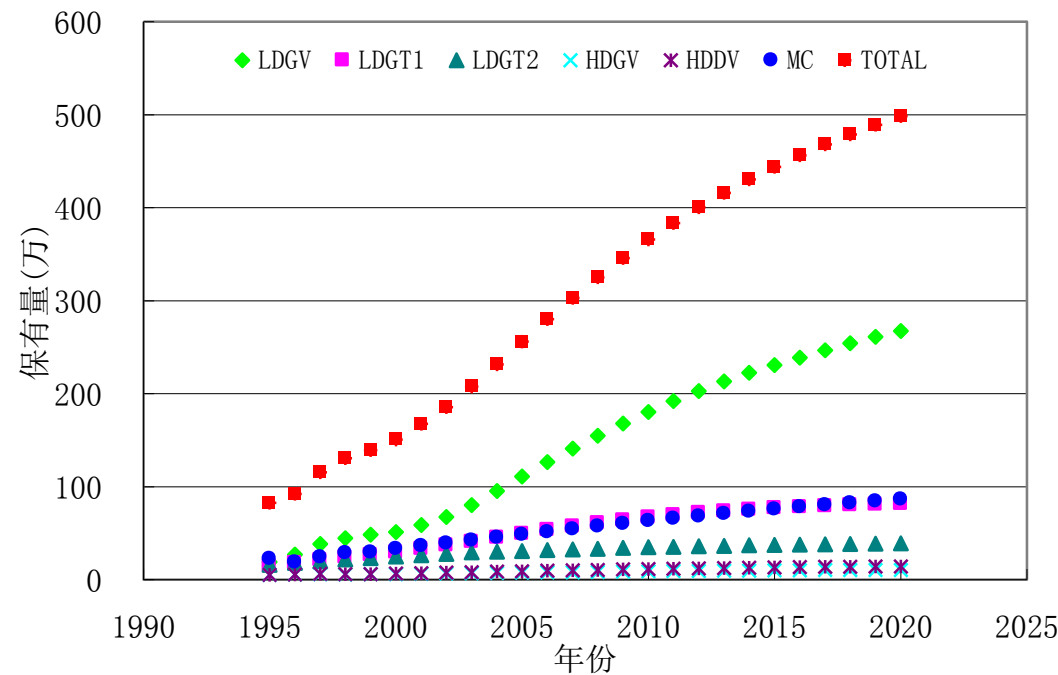


图 3-13 北京市机动车分车型保有量增长趋势

3.4.3 基准方案（BAU）机动车排放量预测

在提出北京市燃气汽车发展规划之前，需要先依据已明确或比较确定的机动车排放控制规划，进行基准方案（Business As Usual，BAU）下的排放量预测，作为参考的基线。

根据北京市机动车保有量增长的预测结果，得到 2008 年各类机动车分车龄的保有量预测。根据政府部门已经采取的控制行动和对未来的发展规划，排放控制水平确定为 2003 年和 2005 年新车分别实施欧洲 2 号和 3 号机动车排放标准，2008 年前后实施欧洲 4 号机动车排放标准，从 2003 年开始加严在用车检查/维护制度（简易工况法）。车辆的年均行驶里程按轻型车比 2000 年稍有减少，重型车略微增加的趋势估算。利用 MOBILE5b 和 PART5 模型计算得到机动车排放因子。具体结果如表 3-13 所示：

表 3-13 北京市 2008 年机动车排放因子

污染物(g/km)	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC
HC	1.31	1.51	2.75	4.70	2.71	4.68
CO	11.79	14.19	23.13	49.43	10.82	12.52
NO _x	0.70	0.74	1.35	3.03	11.96	0.08
尾气管排放 PM10	0.015	0.024	0.044	0.106	0.705	0.012

此外，北京市公交车中已经应用了 2000 辆单一 CNG 车、2004 年以前投入使用 410 辆排放达欧 3 的柴油车、现有约 650 辆无轨电车，以及基本确定发展的约 20 辆纯电动车和 6 辆燃料电池车，在进一步计算 2008 年基准方案的机动车排放量时，考虑这些公交车对总排放的削减。结果如表 3-14 所示。

表 3-14 北京市 2008 年基准方案机动车排放量（单位：吨）

	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC	总和
HC	40766	15440	14457	5950	4364	11720	92697
CO	368257	145026	121462	62509	15105	31325	743683
NO _x	21936	7561	7065	3828	16429	202	57021
PM10*	468.5	245.4	231.0	134.1	937.7	29.4	2046

注：尾气管排放量

将 2000 年和 2008 年基准方案的机动车污染物排放量加以比较，如图 3-14

所示。可以看出，在基准方案实施的排放控制措施下，即使北京市机动车保有量以 10.3%的年均速率迅速增长，2008 年机动车总排放较 2000 年仍呈现下降的趋势。

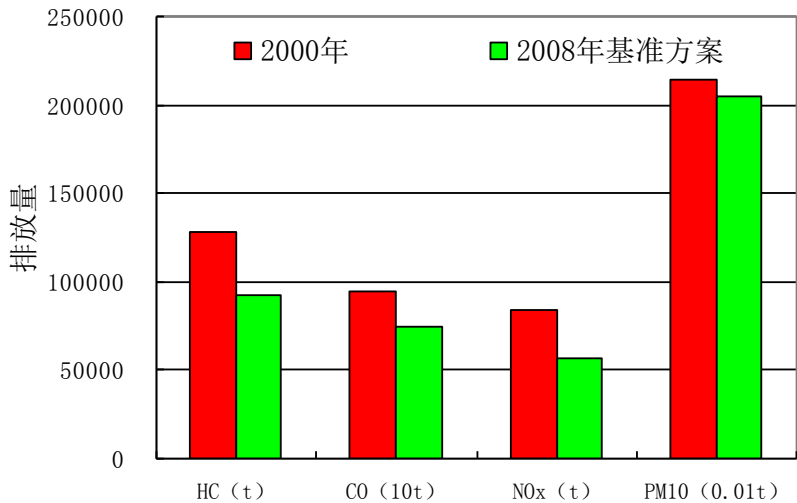


图 3-14 北京市 2000 年和 2008 年基准方案的机动车排放比较

图 3-15 为北京市 2008 年基准方案机动车排放的分车型分担率。

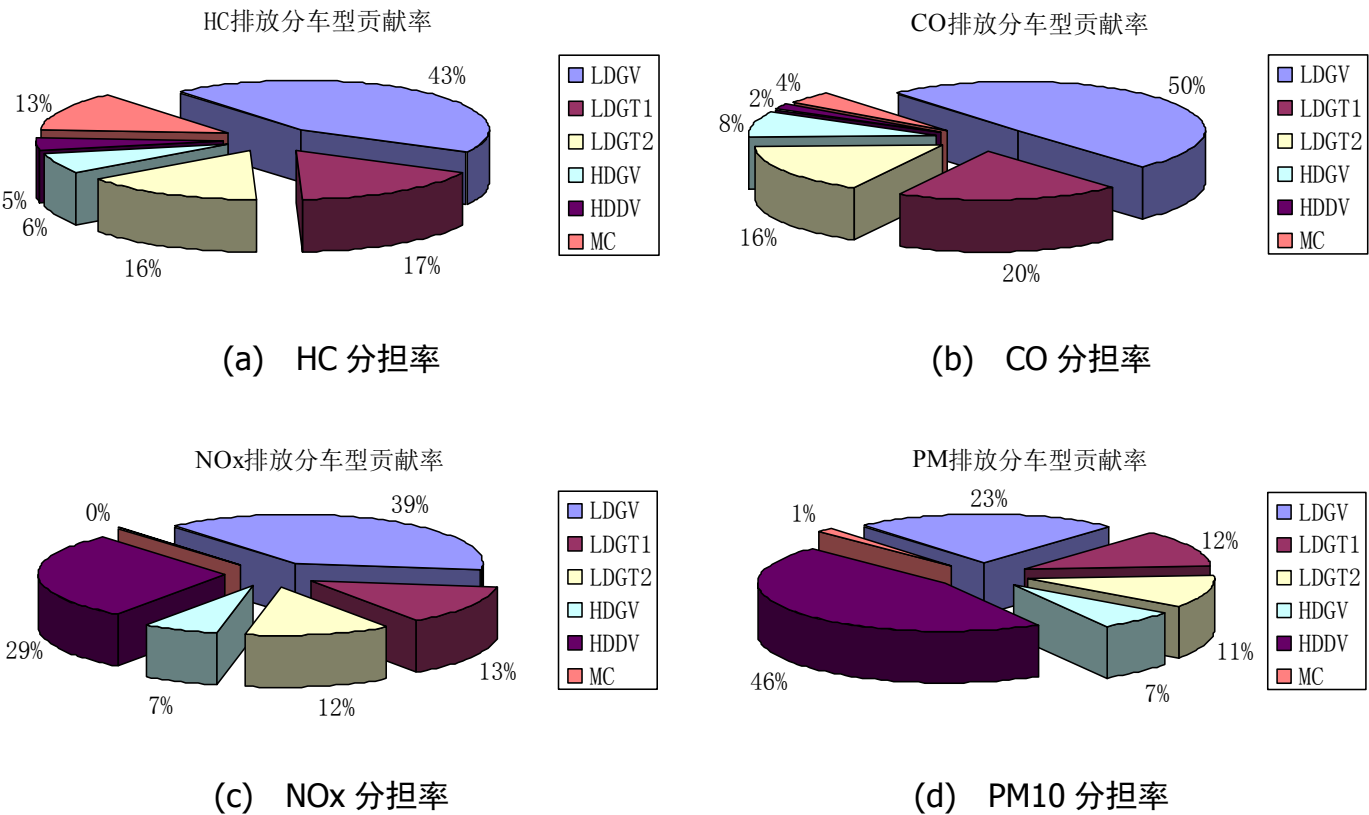


图 3—15 北京市 2008 年基准方案下机动车排放分车型分担率

比较图 3—7 和图 3—15，可以得到以下结论：

- 在 HC 和 CO 排放上，LDGV 已经跃居为最主要的贡献者，而且远远高于其它各类车辆，分担率均在第二位的 LDGT1 的两倍以上。LDGT1 和 LDGT2 的 HC 和 CO 排放对总排放的分担率差不多，分别处于第二和第三的位置。这三者的加和分别占到机动车 HC 总排放的 76%和 CO 总排放的 86%。从控制 HC 和 CO 排放的角度考虑，轻型车仍是重点。MC 对 HC 总排放的分担率增加到 13%，需要考虑进一步控制。
- LDGV 和 HDDV 是 NO_x 排放最主要的贡献者，分担率分别为 39%和 29%，都比位于第三、第四的 LDGT1 和 LDGT2 的加和（25%）还要大，说明除了要控制轿车的 NO_x 排放外，应进一步加严对重型柴油车的 NO_x 排放控制。
- 在 PM₁₀ 排放上，重型柴油车仍处于主要贡献者的地位。在轿车的保有量迅速增长的前提下，其 PM 排放对总排放的分担率有较明显的增加。从控制机动车 PM₁₀ 排放的角度出发，重型柴油车仍是绝对的重点。另外，HDGV 的情况和 2000 年比较相似，对重型汽油车的排放加大控制力度，也可能取得比较明显的成效。

同样，这里对北京市 2008 年出租车和公交车的排放也进行了单独的预测。2000 年北京常住人口为 1108 万，大型公交车有 9725 辆，小型公共汽车 3251 辆，另有无轨电车 628 辆。根据对北京市 2008 年人口的预测，常住人口将达到 1171 万，流动人口 300 万，因此全市总人口将接近 1500 万。按照 2008 年的交通发展规划，每万人拥有公交车 12 辆以上，预计大型公交车总数将达到 18000 辆。2000 年北京环卫车辆为 3000 辆，邮政车辆约为 2500 辆，预计 2008 年将基本维持这个数值。2000 年北京市的出租车为 62600 辆，随着私人轿车保有量的迅速增长，出租车数量已基本达到饱和，估计到 2008 年出租车总量不会发生太大变化，大约为 65000 辆。排放估算的结果见表 3—15。

表 3—15 2008 年基准方案下北京市公交车和出租车的排放

	保有量(辆)		HC	CO	NO _x	PM ₁₀ *
出租车	65000	排放因子(g/km)	1.56	20.23	0.66	0.018
		排放量(吨)	8096	105180	3410	47
		占总排放比例	8.7%	14.1%	6.0%	4.6%

公 交 车	18000	排放因子	汽油车	6.26	86.97	3.60	0.109
		(g/km)	柴油车	3.72	14.59	17.28	0.710
		排放量(吨)		4358	31651	10464	363
		占总排放比例		4.7%	4.3%	18.4%	17.7%

注：尾气管排放量

比较表 3—9 和表 3—15，可以看到，在 2008 年基准方案下，出租车的排放占总排放的比例相比 2000 年有明显的降低，公交车的排放所占比例则有较明显增加，而从排放控制水平上看，两者都有显著的提高，单车的排放都有不同程度的降低，但由于公交车的数量相比 2000 年增加了 85%，尽管到目前为止，已经采取了包括引入单一 CNG 公交车、发展无轨电车和低排放柴油车等一系列措施，但总排放还是有增加，需要采取进一步措施。

3.5 北京市 2008 年燃气汽车发展规划

从第二章中对各种替代燃料车的费用效果分析得出的结论，初步确定 2008 年前后可能在北京市应用的燃气汽车车型为单一 CNG 公交车、单一 LPG 轿车和单一 CNG 卡车，也可以考虑 LNG 卡车。下面将就这几种燃气汽车在 2008 年的排放因子进行预测。

3.5.1 几种燃气汽车的排放因子预测

3.5.1.1 单一 CNG 公交车

如前所述，根据美国能源部 1998 年发布的重型车和发动机资源指南，Cummins 公司生产的各型号专用 CNG/LNG 发动机都是在配备尾气净化装置后达到 EPA 超低排放车标准(ULEV)，LPG 发动机能达到 EPA 低排放车标准(LEV)，而 Cummins 公司的说明书中给出 CNG 发动机在不使用尾气净化设备时就能达到现行的 EPA/CARB 重型发动机排放标准。

现将上述几个标准以及国内引入的欧洲机动车排放标准进行比较，见表 3-16。

表 3-16 重型压燃式发动机和城市公交车排放标准（单位：均为 g/bhp-hr
）

标准 ^a		CO	HC/NMHC/CH ₄	NOx	NMHC+NOx	PM	HCHO ^g
美国 EPA 现行标准		15.5	1.3/—/—	4.0	—	0.10（城市公交车限值为0.05）	—
加州空气资源管理局（CARB）现行标准		15.5	1.3/1.2/— ^b	5.0（城市公交车限值为4.0，还可选择限值为0.5~2.5）	—	0.10（城市公交车限值为0.05）	0.05
美国联邦低排放车标准（LEV） ^c		15.5	—/—/—	—	3.8	0.10	—
美国联邦超低排放车标准（ULEV） ^c		7.2	—/—/—	—	2.5	0.05	0.025
美国 EPA/CARB 2004 年后标准		15.5	—/0.5/—	2.0	2.4 ^d	0.10（城市公交车限值为0.05）	—
欧洲 1 号		3.4	0.82/—/—	6.0	—	0.46（85kW 以上发动机限值为0.27）	—
欧洲 2 号		3.0	0.82/—/—	5.2	—	0.19（1998 年以后限值为0.11）	—
欧洲 EEVs 标准 ^e	ESC	1.1	0.19/—/—	1.5	—	0.01	—
	ETC	2.2	—/0.30/0.48 ^f	1.5	—	0.01	—
欧洲 3 号	ESC	1.6	0.49/—/—	3.73	—	0.07 ^h	—
	ETC	4.1	—/0.58/1.19 ^f	3.73	—	0.12 ⁱ	—
欧洲 4 号	ESC	1.1	0.34/—/—	2.61	—	0.01	—
	ETC	3.0	—/0.41/0.82 ^f	2.61	—	0.02	—

注：

- 美国 EPA 和加州的标准采用 EPA 瞬态测试规程，欧洲 1 号和 2 号标准采用 ECE R-49 测试循环，欧洲 EEVs 标准和欧洲 3 号标准中制造商可选择用 ESC 和 ETC 测试循环中的一种，欧洲 4 号标准则要求采用两种测试循环的发动机排放都要达限值。
- 柴油车、
- 美国为替代燃料车项目制定的排放标准
- 制造商可选择 NMHC+NO_x 的联合限值或 NMHC、NO_x 的单独限值
- EEVs 指“加严型环境友好车辆（enhanced environmental friendly vehicles）”是欧盟环境部长会议为超低排放车专门设立的更严格标准
- 欧洲 3 号和 4 号标准中 ETC 测试的 CH₄ 限值仅针对天然气发动机
- HCHO 限值是应用于甲醇和乙醇车辆

- h. 对单缸排气容量小于 0.75 升及额定功率下转速大于 3000rpm 的发动机限值为 0.10g/bhp-hr
- i. 对单缸排气容量小于 0.75 升及额定功率下转速大于 3000rpm 的发动机限值为 0.16g/bhp-hr

由表 3-16 可以看出，美国超低排放车标准相比现行的 EPA/CARB 标准，CO、NMHC+NO_x 的限值都降低约 50%，这意味着对 Cummins 公司的 CNG 发动机而言，加装尾气净化装置对降低这几种污染物的排放效果明显；尽管 PM 的限值没有变化，但催化转化设备在对尾气进行选择氧化还原的过程中，PM 的浓度也会有所降低，这一点从上面提到的实验结果中可以看出：对 30 辆大部分配备尾气净化装置、安装 L10-260G/280G 型发动机的公交车进行的 161 次排放测试，其 PM 排放均值为 0.016g/km，比前面对未配备尾气净化装置、安装 C8.3-250G 发动机的公交车 PM 排放（0.053g/km）低 2/3 以上。

因此，鉴于技术进步和重型车排放标准的加严，未来北京市在引入更多的专用天然气汽车时，应采用闭环反馈电子喷射系统的 CNG/LNG 发动机加尾气净化装置的技术，对专用 LPG 汽车也应如此。到 2008 年，北京市现有的 2000 辆单一 CNG 公交车将仍在服务，其排放因子基于第一章的结果计算；而对将来购置的新车，其排放因子根据上述分析估算如下，见表 3-17。

表 3-17 北京市 2008 年单一 CNG 公交车排放因子

污染物	HC	CO	NO _x	PM
排放因子(g/km)	4.46	2.47	2.71	0.029

注：HC 的排放因子实际是根据 NMHC 的控制水平估算，但在比例上乘了 1.5 的系数；这是考虑 CH₄ 在 HC 中占了 90% 以上，但从欧洲 3 号标准开始，对 CH₄ 也开始进行控制，所以这种估算是可以接受的。

对于单一 CNG/LNG 卡车，其单车的排放水平和单一 CNG 公交车差别不大，故对其采用和单一 CNG 公交车相同的排放因子。

3.5.1.2 专用 LPG 出租车

2003 年初在北京出租车中引入的 600 辆现代 Sonata LPG 轿车，其尾气排放达到当时的北京市新车排放标准，即相当于欧洲 2 号标准。根据荷兰 TNO 道路机动车研究所进行的车辆排放测试实验，欧洲 1994 年左右几种车型的汽油和

LPG 轿车在排放上比较接近，其结果如图 3-11 所示。

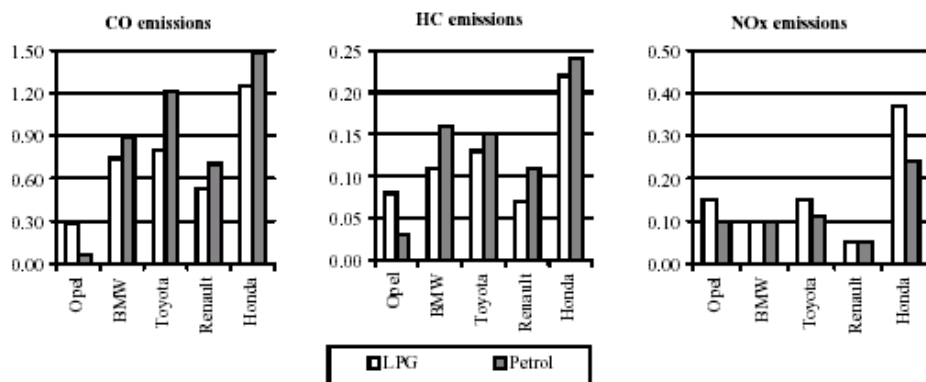


图 3-11 汽油和 LPG 轿车排放水平比较（单位：g/km）

从图中可以看出，5 种车型的排放测试中，4 种车型的 LPG 轿车在 CO 和 HC 排放上低于同类汽油车，但 3 种车型的 LPG 轿车的 NOx 排放则高于同类汽油车（另 2 种车型为相同）。如第一章中所述，随着汽油车排放控制技术的不断提高，LPG 车和汽油车排放之间的差别越来越小，根据欧洲实施机动车排放控制的进程，图 3—11 中 5 种车型的轿车排放应该介于欧洲 2 号标准和 3 号标准之间，因此，可以认为北京市再引进新的单一 LPG 轿车，和新的汽油轿车排放水平相同。但截止到 2001 年底，北京市已经建成 LPG 加气站 62 座，弃之不用会造成很大的浪费，鉴于 LPG 轿车在车价和运行费用上和汽油轿车都相当接近，可以考虑在出租车队中保持一部分 LPG 车（是单一 LPG 车型，而并非原先的双燃料车），作为能源结构的调整，但不再考虑其减排效益。

3.5.2 2008 年天然气汽车发展规划

2008 年的北京作为奥运会举办城市，空气质量状况受到重点关注。根据全市机动车保有量和排放量预测、交通发展规划和机动车排放控制的要求，本研究首先针对目前应用广泛的天然气汽车提出发展方案，内容包括车辆类型、应用领域和推广规模等。

3.5.2.1 机动车排放控制目标

根据北京市目前的空气质量状况，首先需要加严排放控制的污染物是 PM10，其次是 SO₂ 和 NOx（不仅是从 NOx 本身考虑，同时也为了控制臭氧污染），再次是 HC 和 CO。由于机动车排放的 SO₂ 非常少，这里不对其进行研究。下面的控制目标将首先以减少 PM10 排放为准，兼顾 NOx、HC 和 CO 排放的削减。

从前面的计算结果可知，北京市 2008 年基准方案下机动车排放的 HC、CO、NO_x 和 PM₁₀，相比 2000 年分别降低了 28.0%、21.3%、32.2%和 4.7%（参看图 3—8，实际上机动车排放的颗粒物粒径通常都在 2 微米以下）。PM₁₀ 排放降低的比例最小，因此更应该作为机动车排放控制的首要出发点。

3.5.2.2 发展天然气汽车的总体思路

在北京市 2008 年总共 325 万辆机动车中，8.8 万辆的重型柴油车对机动车 PM₁₀ 总排放的贡献最大，占到 46%，而大型公交车（其中重型柴油车约 9900 辆，其它为重型汽油车和单一 CNG 车等）则占到了总排放的 17.7%，所以控制机动车排放的 PM₁₀，首先考虑公交车。

✧ 公交车

基于第二章的分析结果，控制公交车的 PM 排放，首先选择用单一 CNG 车替换重型柴油车。尽管北京市对公交车的排放已经采取了不少的严格控制措施，但由于 2008 年公交车保有量相比 2000 年增长了 85%，导致基准方案下公交车的 PM₁₀ 排放相比 2000 年增加了约 15%；因此发展天然气汽车的目标，首先定为保证 2008 年公交车的 PM₁₀ 排放相比 2000 年没有增加或更低，即基准方案中的 363 吨 PM₁₀ 排放要减少到 273 吨以下。利用上面得到的各类型公交车排放因子，结合公交车的年均行驶里程，进行反向推算，发现在现有的 2000 辆单一 CNG 公交车基础上，再新增 2500 辆单一 CNG 公交车（加装尾气净化设备，排放低于现有的 CNG 公交车，排放因子见表 3—11），将使公交车的 PM₁₀ 总排放降至 270 吨，达到控制目标。

如果考虑和全市大气污染的控制力度结合，做进一步的削减，则参考北京市“绿色奥运”发展规划中 PM₁₀ 浓度的降低比例： $(1 - 0.100/0.162) * 100\% = 38.3\%$ ，公交车的 PM₁₀ 排放需要降到 168 吨以下。反向推算的结果表明，在现有的 2000 辆单一 CNG 公交车基础上，再新增 5000 辆单一 CNG 公交车（加装尾气净化设备，排放低于现有的 CNG 公交车，排放因子见表 3—11），公交车的 PM₁₀ 总排放将降至 170 吨左右，基本达到控制目标。

✧ 市政车辆

重型柴油车中，除了公众关注的公交车外，非私人的车辆还有环卫车等。

参考国外的经验，环卫车也是天然气汽车发展的一个主要领域。目前北京市的环卫车在 8000 辆左右，未来几年内的数量将基本保持这个水平，参考天然气公交车的发展规模，考虑将环卫车辆尾气直接排放的 PM10 削减 35%~40%左右，确定在环卫车队中发展 3000 辆左右的天然气车辆。根据国外的发展经验，结合国内和北京市目前具备的条件，确定发展单一 CNG 卡车和单一 LNG 卡车各 1500 辆。

✧ 出租车和私家车

再考虑天然气车在出租车领域的发展。出租车同公交车一样，具有高使用频率和高行驶里程的特征，发展一定规模的替代燃料车或低排放车，能够取得较好的效益。从前面的分析可知，在日益严格的机动车排放标准下，天然气轿车虽然在 CO 排放上相比同类汽油轿车有较大的降低，但 PM10 和 NOx 的排放却相差很小，加上其应用时还存在续驶里程有限、车辆有效使用空间小等问题，从有效改善北京市空气质量的角度出发，目前不必在北京发展天然气出租车。

由于私家车需要更加灵活方便的使用条件，在私家车中发展天然气轿车，将会遇到更大的阻力，如加气站的网络建设一般就很难满足私家车的使用要求。

上面确定了两套发展方案的总体思路，下面就这两套方案进行具体的分析。

3.5.2.3 天然气汽车发展方案一

方案一的具体内容如表 3-18 所示，从上到下代表了发展的优先程度。

表 3-18 北京市 2008 年天然气汽车发展方案一

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	18000	单一 CNG（新）	2500	13.9%
		单一 CNG（旧）	2000	11.1%
市政车辆 （环卫车）	8000	单一 CNG	1500	18.8%
		单一 LNG	1500	18.8%

按照上面提出的方案，根据(3-6)式计算各类车辆的排放削减量，着重强调引入天然气汽车后单车排放因子的变化。

表 3—19 给出 2008 年天然气汽车发展方案一对机动车排放的削减结果。可以看出，方案一对于北京市 2008 年机动车常规污染物排放的削减效果，绝对量由高至低依次为 NO_x、CO、PM₁₀ 和 HC，相对比例由高到低依次为 PM₁₀、NO_x、CO 和 HC（HC 排放削减为负值，表明 HC 排放出现了增加，但其中主要是甲烷排放的增加）。

表 3-19 北京市 2008 年天然气汽车发展方案一的排放削减

相比同类柴油车的排放量削减（吨）		HC	CO	NO _x	PM ₁₀
公交车	单一 CNG（新）	-240	1148	1272	93
	单一 CNG（旧）	-417	660	872	78
市政车辆 （环卫车）	单一 CNG	-105	501	555	41
	单一 LNG	-105	501	555	41
总计（吨）		-867	2810	3254	252
相比基准方案总排放量的削减比例		-0.9%	0.4%	5.7%	12.3%

基础设施建设情况如表 3—20 所示：

表 3—20 北京市 2008 年天然气汽车发展方案一的基础设施建设

车辆数	每座站服务车辆数	需要加气站数量	已有加气站数量	待建加气站数量
7500	约 120	60	24	36

相关的增加投资和运营成本如表 3—21 中所示。

表 3-21 北京市 2008 年天然气汽车发展方案一的成本（万元）

		车辆购置总投资	车辆购置增加投资	车辆运营总成本	车辆运营增加成本	基础设施建设投资	基础设施维护成本	总成本	增加成本
公交车	单一 CNG（新）	175000	75000	122375	-16185	20000	36000	353375	114815
	单一 CNG（旧）	—	—	113868	3020	—	28800	142668	31820
市政车辆 （环卫车）	单一 CNG	90000	45000	47790	-6102	12000	21600	171390	72498
	单一 LNG	105000	60000	49410	-4425	14400	28800	197610	98775
总计		370000	180000	333443	-23692	46400	115200	865043	317908

对表 3—21 中的数据，需要注意几个问题：

(1) 对各种天然气汽车而言，其总成本相比同类柴油车都有较大增加，主要体现在车辆购置增加投资和基础设施建设投资两项。由于公交车和市政车辆都属于公众服务设施，很难做到完全的商业化运营，所以政府针对投资增加，给予适当的财政补贴是必要的。

(2) 新的单一 CNG 公交车，车辆购置成本取为 70 万元/辆，对应的同类柴油车购置成本为 40 万元/辆，差价为 30 万元/辆。这是根据当前情况估计的较高的价格。由于天然气汽车的技术一直在不断完善，市场化的程度不断提高，其车辆成本必定呈现下降的趋势，和同类柴油车之间的差价会逐步缩小。因此，表中的车辆购置总投资和增加投资两项可能会降低。

(3) 对新的单一 CNG 公交车、单一 CNG/LNG 环卫车都可以看到，估计的车辆运营增加成本均为负值，即车辆运营成本相比同类柴油车要低。这个估算结果和燃料价格的关系非常密切。近年来，由于燃料油供应紧张，价格不断上涨，2004 年 5 月北京市 0# 柴油的零售价已涨到 3.3 元/升，未来还可能有上涨的趋势，计算中取 3.5 元/升。而计算中天然气的价格取 1.9 元/立方米，是北京市目前的批发价格（非零售价格，因为加气站的投资有单独的估算），预计在近一两年内，这个价格还会有较大的下调趋势，那么天然气汽车的运营成本还会更低。

(4) 旧的单一 CNG 公交车运营成本较高，除了车辆维护成本比新车高以外，主要的一个原因是旧车的燃料经济性不高。据调查，目前北京市在用的单一 CNG 公交车平均百公里耗气量达到 47.6 立方米，明显低于同类汽、柴油车的燃料经济性。分析其原因，很可能是这些单一 CNG 公交车使用的康明斯 B5.9-195G 型专用天然气发动机马力偏小。根据表 3—2 的数据，这个型号的发动机马力为 195 hp，适合中型车使用；而美国的天然气公交车一般都使用 C8.3G 或 L10G 型专用天然气发动机，其马力通常在 240—300 hp 范围内。因此，北京市在用的单一 CNG 公交车常常出现超负荷行驶的问题，包括下雪天由于马力不够，爬坡都有困难。对于新的单一 CNG 公交车，建议购置适合重型公交车使用的大马力专用天然气发动机。

3.5.2.4 天然气汽车发展方案二

方案二的具体内容如表 3—22 所示，从上到下代表了发展的优先程度。

表 3-22 北京市 2008 年天然气汽车发展方案二

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	18000	单一 CNG（新）	5000	27.8%
		单一 CNG（旧）	2000	11.1%
市政车辆 （环卫车）	8000	单一 CNG	1500	18.8%
		单一 LNG	1500	18.8%

表 3—23 给出 2008 年天然气汽车发展方案二对机动车排放的削减结果。可以看出，方案二对于北京市 2008 年机动车常规污染物排放的削减效果，绝对量由高至低依次为 NO_x、CO、PM₁₀ 和 HC，相对比例由高到低依次为 PM₁₀、NO_x、CO 和 HC（HC 排放削减为负值，表明 HC 排放出现了增加，但其中主要是甲烷排放的增加），其中 PM₁₀ 排放的削减比例下降了近 17%。

表 3-23 北京市 2008 年天然气汽车发展方案二的排放削减

相比同类柴油车的排放量削减（吨）		HC	CO	NO _x	PM ₁₀
公交车	单一 CNG（新）	-481	2296	2544	186
	单一 CNG（旧）	-417	660	872	78
市政车辆 （环卫车）	单一 CNG	-105	501	555	41
	单一 LNG	-105	501	555	41
总计（吨）		-1108	3958	4525	345
相比基准方案总排放量的削减比例		-1.2%	0.5%	7.9%	16.9%

基础设施建设情况如表 3—24 所示：

表 3—24 北京市 2008 年天然气汽车发展方案一的基础设施建设

车辆数	每座站服务车辆数	需要加气站数量	已有加气站数量	待建加气站数量
10000	约 120	80	24	56

相关的增加投资和运营成本如表 3—25 中所示。

表 3-25 北京市 2008 年天然气汽车发展方案二的成本（万元）

	车辆购	车辆购	车辆运	车辆运	基础设	基础设	总成本	增加
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

		置总投资	置增加投资	营总成本	营增加成本	施建设投资	施维护成本		成本
公交车	单一 CNG（新）	350000	150000	244750	-32370	40000	72000	706750	229630
	单一 CNG（旧）	—	—	113868	3020	—	28800	142668	31820
市政车辆 （环卫车）	单一 CNG	90000	45000	47790	-6102	12000	21600	171390	72498
	单一 LNG	105000	60000	49410	-4425	14400	28800	197610	98775
总计		545000	255000	455818	-39877	66400	151200	1218418	432723

对表 3—25 中的数据，同样需要注意和表 3—21 中相同的几个问题。

3.5.2.5 对确定公交车排放控制目标的一点说明

方案一中确定的公交车排放控制目标为 PM10 总排放相比 2000 年不增加，和机动车排放控制的总目标不一致，这里说明一下原因。

首先，大型公交车从 2000 年的不到 10000 辆发展到 2008 年的 18000，保有量增长了 80%，增长速率很大。虽然机动车总保有量从 2000 年的 151 万辆，到 2008 年预计增长到 325 万辆，增长了 115%，但这其中主要是轻型汽油车的贡献，重型汽、柴油车只是从 2000 年的 12.5 万辆增长到 2008 年的 18.9 万辆，增长了 51%。公交车保有量的快速增长必然给污染物排放控制带来更大压力。

其次，公交车是为公众的出行服务，具体一点，主要是为中低收入市民出行服务。大力发展城市公交，相对来说属于社会的福利事业，将改善中低收入市民的出行条件。对公交车的排放总量控制过严，有可能阻碍其发展，也会给社会发展带来一定的负效应。

第三，城市公交属于大规模的客运体系，平均而言，每辆公交车运载 80～100 个乘客，而每辆私家车只运载不到 2 个人，根据世界银行的《城市交通》、Asif Faiz 的《汽车空气污染：发展中国家的问题和选择》等研究，选择不同交通工具时每一乘客每公里的总排放量（包括 HC、CO、NO_x、TSP、SO_x 及醛类），私家车是 18.97g，而公交车只有 1.02g。根据本研究估算得到的排放因子，比较如下：

表 3—24 选择不同交通工具的每一乘客每公里排放量 /g

	HC	CO	NO _x	PM10
私家车	1.48	12.26	0.90	0.009

公交车	0.09	0.92	0.18	0.006
-----	------	------	------	-------

从表 3-24 中可以看到，无论是 HC、CO，还是 NO_x 和 PM₁₀，公交车的每一乘客每公里排放量都低于私家车。虽然公交车的集中排放更易于控制，但把排放控制的矛头都对向公交车，从单人排放水平上来说是不公平的。

综上所述，本研究制定的方案一规划中，公交车 PM₁₀ 排放控制指标的设定是考虑了诸多因素以后的一个权衡值，是比较合适的。

3.5.3 2008 年液化石油气汽车发展方案规划

从前面的讨论可以看到，由于 LPG 燃料本身的动力性能限制，目前国内外都很少有大马力的 LPG 发动机，在重型车中，LPG 汽车很难和柴油车、天然气车等车型竞争。从北京市发展燃气汽车的经验来看，在公交车中应用 LPG 基本也是不成功的。因此，在北京市发展 LPG 汽车，不再考虑重型车。

在轻型车中，首先考虑发展 LPG 汽车的领域仍然是出租车。北京市在出租车中推广 LPG 的行动也出现了很多问题，出租行业的反对意见很大。但通过调查和分析，其中主要存在以下几个问题：

- (1) 汽油车改造成汽油—LPG 双燃料车。在没有改造技术规范的要求，没有有效的监督管理下，这样的改造通常效果都比较差，对发动机系统所做的调整，往往使车辆无论使用汽油还是 LPG 都很难达到最佳的燃烧状态，不仅车辆的动力性能降低，排放也反而增加。从表 3-4 中墨西哥城改造 LPG 车的平均排放因子比较也可以得到这样的结论。
- (2) 车辆加气不方便，LPG 的气质难以保证。现有的 LPG 加气站分布不合理，在城区（三环以内）的加气站太少，导致出租车司机加气不方便。关于 LPG 的气质，也有很多使用过 LPG 的出租车司机反映气质没有保证，导致动力下降，管路堵塞等问题，车辆进行发动机维护保养的次数增加。了解其原因，主要是一些气站购入价格较低、质量较差的民用气来作为车用气销售。
- (3) 成本问题。经济效益是出租车司机是否选用 LPG 的最大推动力。从目前的情况看，LPG 和汽油的差价还不足以使出租车司机选用 LPG；而

调查表明，多数司机认为价差应在 1.20 元/升以上比较合理（目前 90# 汽油和 LPG 的价格为 1.0 元/升左右）。1999 年，LPG 加气站排队加气时的油气差价是 1.3—1.4 元/升。在没有拉开价差的同时，强制要求出租车自费安装 LPG 气罐等设备，导致一些出租车公司和司机认为“花钱买了个没用还占地的大铁罐”，反对意见较大。

根据对 LPG 汽车和同类汽油车的比较，随着机动车排放标准的日益加严，LPG 汽车在降低排放上已经没有什么优势。发展 LPG 汽车，对于北京市空气质量进一步改善的效果很小，更多是要从能源战略安全和能源结构调整的角度出发。北京市已建设的 LPG 供应站有 62 座，如果因为上面的问题而完全停止发展 LPG 汽车，意味着这些 LPG 供应站大部分将被废弃，这不仅是一种资源的很大浪费，也违背了政策的延续性。而要想发展 LPG 汽车，则必须解决以上的几个问题。从目前的情况来看，解决办法如下：

- (1) 只推行单燃料 LPG 轿车。北京市于 2003 年初投入使用了 600 辆 Sonata 单燃料 LPG 出租车，调查表明 95% 的司机认为其综合性能不错，而排放也达到了同期的欧洲 2 号排放标准。只推行国内外汽车厂商原产的单燃料 LPG 轿车，能够保证车辆的使用性能和排放，同时也避免了购车后再加装气罐的附加程序和费用。
- (2) 进一步降低车用 LPG 气价。尽管汽油价格在上涨，但要促使出租车司机去选择使用 LPG，还需要进一步降低车用 LPG 气价。如果将车用气价格从现在的 2.2 元/升降至和民用气的价格相当，即车用气价格降至 1.7—1.8 元/升，则能够避免气站购入民用气来作为车用气销售，保证了车用 LPG 的气质。

根据目前北京市已建成的 LPG 加气站数量，按每个加气站服务 350—400 辆出租车计算，总共可以服务 2 万—2.5 万出租车。对于在私家车中发展 LPG 汽车，由于存在加气站网络覆盖面积有限的问题，难以满足私人轿车的使用要求，故不作考虑。因此，提出北京市 2008 年 LPG 汽车的发展规划如下：

表 3—25 北京市 2008 年 LPG 汽车发展方案

应用领域	车型	车辆数	需要加气	已有加气	待建加气
------	----	-----	------	------	------

			站数量	站数量	站数量
出租车	单燃料 LPG 轿车	20000	50—60	62	—

由于今后引入的 LPG 轿车，和同类汽油车的排放已基本处于相同的水平，对于 LPG 汽车发展方案的排放不再进行单独估算。

单燃料 LPG 轿车的成本相比同类汽油车，大约高出 1.5 万—2 万元。如果油气差价 1.4 元/升，LPG 出租车的年运营成本将比同类汽油车低 6400 元左右，三年内能够回收购车增加的成本。如果油气差价 1.2 元/升，LPG 出租车的年运营成本将比同类汽油车低 4600 元左右，至少四年才能回收购车增加的成本。由于出租车的使用寿命短（一般 4—5 年），所以应考虑购车时给予 5000 元/辆以上的财政补贴，让车主能够接受这个购车的增加成本。

3.6 发展燃气汽车的一些相关问题

3.6.1 燃料质量

燃料质量对机动车排放的影响很大。Cummins 公司对其燃气发动机使用的气质有推荐的标准。就天然气而言，将 Cummins 公司的推荐标准和美国加州的车用天然气标准、国内汽车用压缩天然气技术要求与比较，如表 3—26 中所列。

表 3—26 车用压缩天然气标准

成分 ^a	Cummins 推荐标准	美国加州标准	国内汽车用压缩天然气技术要求
甲烷	≥90%	≥88.0%	—
乙烷	≤4%	≤6.0%	—
丙烷	≤1.7%	丙烷以上烃类总共 ≤3.0%	—
丁烷以上烃类	总共 ≤0.7%	—	—
己烷以上烃类	—	总共 ≤0.2%	操作压力和温度下，不应存在液态烃
惰性气体（N ₂ ，CO ₂ ）	总共 ≤3.0%	1.5~4.5%	CO ₂ ≤3.0%
氧气	≤0.5%	≤1.0%	≤0.5%
氢气	≤0.1%	≤0.1%	—
CO	≤0.1%	≤0.1%	—

硫分	$\leq 0.001\%$ (质量比)	$\leq 16\text{ppm}$ (体积比) $\approx 0.003\%$ (质量比)	总硫 $\leq 200\text{mg/m}^3 \approx 0.026\%$ (质量比)
硫化氢	—	—	$\leq 15\text{mg/m}^3 \approx 0.002\%$ (质量比)
沃伯指数 (MJ/m^3) ^b	48.46~51.33	—	—
甲烷值	≥ 80 (标准发动机) / ≥ 65 (改进技术)	—	—
低热值	$\geq 43.7\text{MJ/kg}$ (改进技术发动机)	—	—
高热值	$\geq 36.3\text{MJ/m}^3$ (标准发动机)	—	$\geq 31.4\text{MJ/m}^3$
水分	—	储罐压力下的露点温度应比 99.0%的冬季设计温度低至少 10 度	最高操作压力下露点温度不应高于 -13°C ; 当地最低气温低于 -8°C 时, 露点温度应比最低气温低 5°C
颗粒物	—	不得含有对加油设备造成损害的足够量的沙尘、油脂等物质	固体颗粒物直径应小于 5 微米
气味	—	须含有特征气味的成分, 能够发现大气环境中天然气浓度低于 1/15 的可燃下限时的存在	应有特殊气味, 必要时加入适量加臭剂, 保证天然气浓度在空气中达到爆炸下限的 20% 前能被察觉

注: a. 气体体积为在 101.325kPa、20 摄氏度状态下的体积

b. 沃伯指数 (Wobbe Index) 表示可燃气体的发热量与其比重的关系, $K = \text{热值} * (\text{比重})^{1/2}$

此外, 美国气体研究所的测量结果表明, 大多数天然气的甲烷值在 63~84 之间; 根据四川石油管理局天然气研究院的分析结果, 华北地区油气田管输天然气的沃伯指数在 48.22~53.25MJ/m³ 之间。

由以上的数据可以看出, 北京市车用天然气的成分指标大部分能满足 Cummins 公司推荐的标准, 但总硫份的含量可能偏高, 这会对尾气净化设备造成影响, 而导致车辆排放增加。建议对车用天然气中的硫份含量做进一步的限制, 如果不能一步达到 Cummins 公司推荐的 0.001% 的限值, 可以先采用美国加州标准的 0.003% 限值。

3.6.2 替代燃料车和发动机的原始设备制造商 (OEM)

根据美国重型车和发动机资源指南, 表 3—27 中给出了主要的原始设备制造

商及发动机型号。

表 3—27 重型车和发动机的 OEM 及型号

燃料类型	OEM	发动机 型号	应用车型	马力	是否安装尾 气净化设备	达标情况
CNG/LNG	Cummins Engine Company	B5.9G	中型车	150-230	是	EPA ULEV
		C8.3G	重型公交	250-275		
		L10G	车或卡车	280-300		
	Detroit Diesel Corporation	50G	重型车	275	是	CARB EPA
		60G	重型车	330	是	
	Caterpillar, Inc.	3306	重型车	250	是	CARB
CNG	John Deere	6068H	中型车	225	N/A	CARB
		6081H	重型车	250		

已知的 LPG 轻型车有：Opel Vectra 2.0 16V、BMW 318I、Toyota Carina E 1.6 Xli、Renault Laguna 2.0、Honda Accord 2.0 iS 以及北京现代汽车新推出的 Sonata 专用 LPG 轿车等。

参考文献

- [1] 北京市发展清洁燃料汽车实施方案. 中国汽车工业信息网, <http://www.autoinfo.gov.cn:1570/cleanauto/integration/sfcs/bj/beijin-1.htm>
- [2] 潘一玲. 对北京市发展清洁燃料汽车的一些想法. 城市交通网, <http://www.chinautc.com> [1] 郝吉明、傅立新、贺克斌、吴烨. 城市机动车排放污染控制. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.1
- [3] 吴烨、郝吉明、李伟、傅立新. 应用 PART5 模式计算机动车尾气管的颗粒物排放. 环境科学, 2002, 23(1): 6~10
- [4] Joyce Dargay, Dermot Gately. Vehicle ownership to 2015: implications for energy use and emissions. Energy Policy, 1997, 25,:1121~1127
- [5] Joyce Dargay, Dermot Gately. Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960-2015. Transportation Research Part A , 1999, 33:101~138
- [6] Peter H.KOBOS, Jon D.Erickson, Thomas E.Drennen. Scenario Analysis of Chinese Passenger Vehicle Growth. Contemporary Economic Policy, 2003,21(2): 200~217
- [7] 国家统计局 编. 中国统计年鉴 1982-2001. 北京: 中国统计出版社
- [8] 国家统计局人口统计司 编. 中国人口统计年鉴 1989-2001. 北京: 中国统计出版社
- [9] 中国交通年鉴社 编. 中国交通年鉴 1986-2001. 北京: 中国交通年鉴社
- [10] 工业交通统计司 编. 中国能源统计年鉴 1997-1999. 北京: 中国统计出版社
- [11] 北京市统计局 编. 北京市统计年鉴 1999-2001. 北京: 中国统计出版社
- [12] 宋家树. 21 世纪能源结构与可持续发展问题. 国际技术经济研究, 1998,2(3): 1~5
- [13] 刘淇 主编. 北京奥运经济研究. 北京: 北京出版社, 2003: 8, 270~271
- [14] 蒋正华. 全国和分地区人口预测. 北京: 中国人口出版社, 1998: 25

- [15] 林富德、刘金塘. 北京人口发展前景 1995-2060. 人口与经济, 1995,5:3~9
- [16] 鲍振荣、张于心、薛立民、鲍枫. 我国城市燃气汽车的发展模式研究. 环境保护,2001.10:42~45
- [17] 冯幸福. 首都公交车辆环保工程的实践与思考. 中国客车网, <http://www.chinabuses.com/webnews/5003.htm>
- [18] 陈书通、朱跃中. 我国未来能源结构变化趋势. 中国工业经济.1997, 3: 62~66
- [19] 王武龙. 加速发展天然气工业,改善我国能源结构. 中国投资与建设.1997, 10: 27~28
- [20] 许宪春. 中国未来经济增长及其国际经济地位展望. 经济研究, 2002
- [21] 北京市环保局. 2000 年北京市环境状况公报.
<http://www.bjepb.gov.cn/newhb/file/filelist3.asp?path=html/hjgb/hjzkgb&title=环境状况公报&image=images/title/hjgb.jpg>
- [22] 清华大学. 北京市大气污染综合防治对策研究报告. 国家科技专项. 2001.12.
- [23] <http://www.cummins-china.com/products/bus/alternative.html>
- [24] http://www.ctts.nrel.gov/heavy_vehicle/emissions.html
- [25] Isaac Schifter, et al. An Evaluation of the LPG Vehicles Program in the Metropolitan Area of Mexico City. J. Air & Waste Manage. Assoc. 2000 (50) : 301-309
- [26] Indian Committee on Auto Fuel Policy. Report of the Expert Committee on Auto Fuel Policy, Chapter 9: Alternative Auto Fuels - CNG and LPG. 2002.8.
- [27] Liu Eva, et al. A Study On LPG As A Fuel For Vehicles. Research and Library Services Division, Legislative Council Secretariat, HK SAR. RP05/96-97. March 1997
- [28] Hien Ly. Effects of natural gas composition variations on the operation,

performance and exhaust emissions of natural gas-powered vehicles. IANGV.
December 2002

- [29] DOE EIA (2004) . Estimated Number of Alternative-Fueled Vehicles in Use in the United States, by Fuel, 1995-2004. http://www.eia.doe.gov/cneaf/alternate/page/datatables/atf1-13_03.html, latest update on Feb 28, 2004
- [30] DOE EIA (2004) . Estimated Consumption of Vehicle Fuels in the United States, 1995-2004. http://www.eia.doe.gov/cneaf/alternate/page/datatables/atf1-13_03.html, latest update on Feb 28, 2004
- [31] 陈赓良. 天然气的互换性及其标准化. 天然气工业. 1999, 19 (2) : 102~107
- [32] 全国清洁汽车行动协调领导小组办公室. 国家燃气汽车重要文件及相关标准汇编, 2000.
- [33] 北京市市政管理委员会. 北京市车用燃气加气站运行情况调查与分析. http://www.bjmac.gov.cn/szkip/zttl_13.jsp
- [34] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy's National Alternative Fuels Hotline. Heavy Vehicle and Engine Resource Guide. U.S. DOE. October, 1998
- [35] Nils-Olof Nylund, Alex Lawson. EXHAUST EMISSIONS FROM NATURAL GAS VEHICLES. IANGV Emission Report. March 2000
- [36] http://www.ctts.nrel.gov/heavy_vehicle/emissions.html

第四章 北京市电动汽车发展规划研究

电动汽车在北京市已经有一些试点的应用，在将来还会有更大的发展。发展电动汽车是国家“清洁汽车行动”的一个重要方面，本章将同第三章一样，首先考察国内外电动汽车的发展情况和经验教训，然后根据北京市的现状和发展条件，提出北京市 2008 年电动汽车发展规划，并加以评估。

4.1 国内外电动汽车的发展情况研究

4.1.1 国外的发展情况研究

纯电动汽车由于接近零排放，噪音很小等优点，世界各国在 20 世纪八十年代，掀起了大规模开发电动汽车的热潮。不少大的汽车公司都曾在纯电动轻型车方面投入小批量生产，比如通用汽车的 1997 EV1 和 1999 EV1、本田公司的 EV+、福特公司的 EV Ranger 和丰田公司的 RAV4 EV 等。但到目前为止，纯电动汽车的几大缺点都未能得到很好的解决，即续驶里程十分有限、动力性能不是很好、蓄电池寿命十分有限及电池的体积庞大等，再加上纯电动汽车价格不菲，所以市场需求一直很小。前面提到的几种电动轿车，除通用汽车的 EV1 车型还在销售外，其它几种都已停产。目前纯电动车只在观光车辆、校车和微型场地车等特殊领域有较多的应用，但福特公司在欧美的几家生产 Think Neighbor 纯电动微型车的工厂，由于销量不好都已经停产。

作为兼有汽、柴油车和纯电动车两者特点的混合动力车，近几年发展相当迅速。到 2003 年 9 月，美国已售出大约 10 万辆混合动力汽车。丰田公司于 1997 年开始销售混合动力轿车“Prius”，根据最新的数据，已经在全球售出近 13 万辆；丰田于 2001 年又推出了第一部四轮驱动的“Estima”混合动力轻型车，该车型采用了独立控制 4 轮动力的全电子控制刹车系统 EBD，并首次加入无级变速 (CVT) 功能。本田公司主要有两款混合动力轿车在市场上销售，分别是 Insight（二座）和 Civic，到 2003 年 9 月，它们已分别在美国市场售出 1.18 万辆和 2.83 万辆。丰田公司还准备在 2005 年推出 Highlander 的一款混合动力轻型车。美国的通用和福特公司紧随其后，也陆续推出混合动力概念车，福特的“Prodigy”混合动力车是为家庭设计，其燃料经济性非常好，而整车质量比目前一般的家

用轿车还要轻，虽然还未投入市场，但已经是做好了充分的准备。据预测，2008 年美国的混合动力车销售量将达到 35 万辆。

在重型车上，混和动力技术主要应用于公交车，为先进的柴油发动机和电动马达技术的结合。日野公司从 1993 年开始销售混合动力城市客车，最初应用于日本国家公园的观光客车，现在已发展到第三代。在纽约，10 辆 Orion VI 混合动力公交车经过四年左右的试用，已经通过了可靠性测试，纽约准备从 Orion 公司再购入 325 辆混合动力公交车。

混和动力技术应用于公交车的另一个案例，是巴西的圣保罗市。和前面不同的是，圣保罗市没有直接购入原产的混合动力车，而是在公交车使用改造的方法。由于混合动力技术具有很大的灵活性，车辆改造也是一种办法，而且可以完全使用本国的技术。但是，和其他类型的改造替代燃料车一样，改造后的混合动力车使用效果如何，还需要更多的了解和测试。目前巴西有一些测试数据，但还不足以对改造混和动力车做出全面客观的评价。

近年来全球对燃料电池汽车的研究非常活跃，全球各大汽车公司都在燃料电池车的研制开发上投入大量人力物力。2002 年的 5~6 月，戴-克公司的甲醇改质型燃料电池汽车“NECAR5”在一辆甲醇燃料供应车的陪同下，从旧金山出发，历经 16 天之后成功横穿了北美大陆。通用公司则于 2002 年推出了两款燃料电池概念车。

不久前，丰田与日野汽车联合开发的公交大巴“FCHV-BUS2”已获得日本政府的公路行驶许可，该车配备以高压氢气为燃料的燃料电池混合系统，采用低地板设计，准备开始公路行驶试验。美国的 SunLine 公司在加州 Berkeley 地区开展了一项燃料电池车的示范项目，包括氢气制造和供应等一套基础设施的试运行，目前的运行成本非常高。欧洲从 2003 年启动一个大规模的燃料电池巴士示范项目，包括 8 国的 10 个城市，每个城市都将有三辆燃料电池巴士参与运营，同时每个巴士总站都将建一加氢站，氢以不同方法制造，有的还将在加氢站现场设有制氢装置。在发展中国家，全球环境基金(GEF)和联合国开发计划署(UNDP)将资助中国、印度、埃及、墨西哥和巴西 5 个国家的 6 座城市，共 46 辆燃料电池公交车，以开展示范工程。总的来说，燃料电池技术还处于开发阶段

，近期内只在试运行或示范项目中有应用。

4.1.2 国内应用案例研究

在电动汽车和燃料电池车的研制方面，我国也一直投入了很大的力度，设立了“863”计划的重大专项。东风汽车公司在“八五”期间就着手电动汽车研究开发工作，先后研制出了纯电动客车(中巴)、电动轿车概念车和燃料电池客车(中巴)、混合动力客车(大巴)等电动汽车。2002 年 7 月，混合动力电动客车在武汉公用客车厂下线，并即将投入小批量生产；同时，东风电动车辆股份有限公司牵头申报的 EQ6100HEV 混合动力城市公交客车开发、EQ7200HEV 混合动力轿车开发两个混合动力整车，以及由华中科技大学等单位申报的 7 个零部件开发项目，已被列入“十五”国家 863 计划电动汽车重大专项首批项目正式启动。由清华大学汽车工程系牵头的十五“863”重大专项一“燃料电池城市客车整车技术的研究开发”项目，刚刚于 2002 年 12 月底通过了国家的验收评审，可能应用于 2008 年的奥运会。而上海汽车集团则与美国通用汽车公司合作，在 2001 年底制造了一辆由燃料电池与蓄电池驱动的串联式混合动力高级轿车，燃料电池使用压缩氢气，最高时速达到 113 公里/小时，最大功率 104 千瓦，零到 100 公里加速时间只需 13.5 秒。

图 4-1 中分别是清华大学汽车系开发研制的燃料电池城市客车的样车，和上汽与通用汽车联合推出的“凤凰”燃料电池高级轿车的样车。



图 4-1 两辆燃料电池车的样车

4.2 北京市 2008 年电动汽车发展规划

4.2.1 发展电动汽车的总体思路

北京市最主要的电动车应用是公交系统的 630 辆无轨电车。无轨电车在北京已经有几十年的发展历史，运营一直比较稳定，但由于需要在城市街道上铺设造价高昂的缆线系统，因此无法做到大规模的发展。根据公交公司自己的规划，2008 年无轨电车发展到 800 辆，是比较合适的。

对于纯电动车，目前正在试用的公交车有几辆，另外还有十几辆校园公交车。国内开发研制纯电动车的时间比较长，已经具备自行生产纯电动车的能力。但到现在为止，仍然未能解决应用纯电动车时的以下几个问题：

- (1) 动力性能不足：受到车辆体积的限制，纯电动车电池储备能源能力有限，无法提供持续长时间的电能供应，这就导致纯电动车动力性较差，续驶里程较短。例如，美国 Santa Barbara 市电动公交车行驶能力大约每天 130 公里，Chattanooga 市电动公交车行驶能力每天不到 100 公里，并且在温度较低的天气下还会削减 25% 左右。与此同时，由于北京目前没有密度较大，技术成熟的充电站设备，纯电动车的能源补给无法得到有效保证。北京市的公交车年均行驶里程在 5.5 万公里以上，以每年使用 330 天计，平均每天的行驶里程在 170 公里左右，在推广纯电动公交车时，线路选择上就遇到了较多的限制。
- (2) 电池生产和废电池的回收问题：纯电动车的电池生产过程中不可避免会带来环境污染，从这个意义上讲，纯电动车并不是真正意义上的零排放车。电池使用到废弃过程较短，以目前北京市 BJD6100-EV 公交车为例，大约每年就需要更换一次电池。由于纯电动车电池体积较大，大量废弃电池堆积无法得到有效处理，势必造成严重的环境问题。
- (3) 费效分析：目前，纯电动车的单车成本依然较高，国内大多在 100 万元左右，如果考虑需要大规模的进行充电站建设，投资将更加巨大。而从排放情况来看，虽然行驶过程中纯电动车接近或几乎达到零排放标准（这还要以技术成熟为前提条件），但如果考虑电力生产过程中的污染物排放

，以及电池生产和废弃所造成的环境污染，从生命周期的角度加以评估，费效分析结果是不理想的。

(4) 能源供应：目前北京的电力资源紧缺，电力供应主要依靠市内和周边地区的电厂。在这种情况下，大力发展纯电动车势必会造成电力资源更加紧张，因此需要慎重的考虑。

混合动力车和燃料电池车在北京市还未曾有过应用。从 4.1.1 节中国外的经验来看，目前混合动力技术的发展和商业化最为迅速，是最有推广潜力的。而燃料电池车的成本仍居高不下，距离商业化还比较远，其费效结果比纯电动车更低（可参考第二章费效分析），在近期内也不可能进行大规模推广，基本确定在全球环境基金资助北京市在 2008 年前建设 6 辆燃料电池车的试点。随着今后电子原件成本逐步下降，有可能逐步的引入。

综上所述，北京市 2008 年电动汽车发展规划，应以混合动力技术为主，而纯电动车和燃料电池车作为局部试点开展，不宜大规模的推广。

4.2.2 几种电动汽车的排放因子预测

混合动力（柴油—电动）公交车的排放因子参考巴西公交车改造的案例研究，估算结果如下：

表 4-1 北京市 2008 年混合动力公交车排放因子

污染物	HC	CO	NO _x	PM
排放因子(g/km)	0.51	1.09	7.26	0.237

对 2008 年北京市单一 CNG 公交车、混合动力公交车和重型汽、柴油车的平均排放因子进行比较，如图 4-2 所示。

从图 4-2 中不难看出，混合动力柴油车在 PM 排放上明显低于重型柴油车，但高于重型汽油车，NO_x 排放亦介于重型汽油车和重型柴油车之间，HC 和 CO 排放则都明显低于重型汽、柴油车。

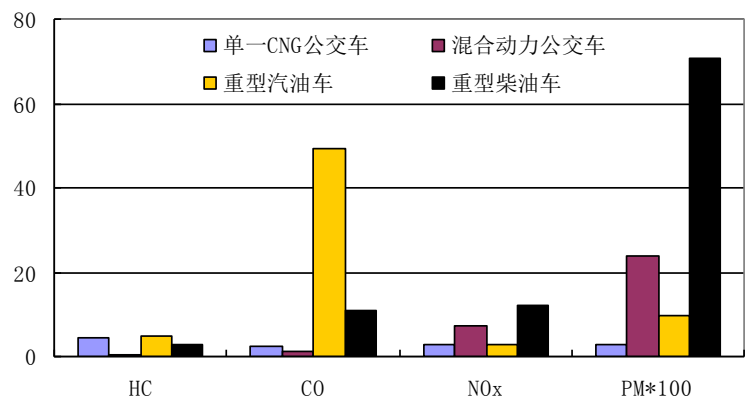


图 3-10 2008 年北京市重型车平均排放因子比较

由于对燃料供应没有特别的要求，混合动力轿车可能应用的领域比较多，包括出租车、私家车和政府用车。出租车的行驶特征和后两者不同，所以排放因子有所差别。虽然发展非常迅速，但混合动力轿车商业化的时间还很短，实际运营车辆的排放测试数据很少，本研究根据新车的型式认证数据，参考汽油轿车排放劣化的过程，估算北京市 2008 年混合动力轿车的排放因子，列于表 4—2。

表 4-2 北京市 2008 年混合动力轿车排放因子 /g · km⁻¹

	HC	CO	NOx	PM
出租车	0.04	0.32	0.072	0.005
私家车/政府用车	0.02	0.16	0.036	0.005

根据确定的总体发展思路，下面提出具体的实施方案，并进行讨论和分析。

4.2.3 电动汽车发展方案一

◇ 公交车

适当发展无轨电车，使其总数达到 800 辆；而电动车方面，已经基本确定的 20 辆纯电动车和 6 辆燃料电池车可以不做变动（北京市对此已经有比较确定和详细的规划，6 辆燃料电池车由全球环境基金（GEF）部分资助），重型车的混合动力技术还不够成熟，尚未达到商业化，借鉴巴西圣保罗市的成功经验，

可改造 100 辆公交车作为试点工程，完全采用国内的技术，以推动混和动力技术的发展。

✧ 出租车和政府用车

再考虑电动汽车在出租车领域的发展。从第二章的结论可知，由于运营费用显著降低，混合动力出租车的总成本比同类汽油车还要低，所以具备相当的发展优势。但混合动力轿车毕竟是项新技术，公众对它的了解和接受需要一个过程，因此考虑在出租车发展 1000 辆混合动力轿车。

此外，鉴于混合动力轿车在美国非常受欢迎，还考虑在北京市的政府用车中发展 2000 辆的混合动力轿车。通过在出租车和政府用车中开展混合动力轿车的示范工程，推动其在私家车领域中的发展。

对于私人轿车领域，混合动力轿车的推广手段将主要依靠车辆本身的市场竞争力，属于商业化操作，这里不再做进一步的讨论。

方案一的具体发展规划如表 4-3 所示，从上到下代表了发展的优先程度。

表 4-3 北京市 2008 年电动汽车发展方案一

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	18000	无轨电车	800	4.4%
		混合动力	100	0.6%
		纯电动	20	0.1%
		燃料电池	6	0.0%
出租车	65000	混合动力	1000	1.5%
政府用车	—	混合动力	2000	—

按照上面提出的方案，根据(3-6)式计算各类车辆的排放削减量，着重强调引入电动汽车后单车排放因子的变化。

表 4-4 给出 2008 年电动汽车发展方案一对机动车排放的削减结果。可以看出，方案一对于北京市 2008 年机动车常规污染物排放的削减效果，绝对量由高至低依次为 CO、NO_x、HC 和 PM₁₀，相对比例由高至低依次为 PM₁₀、NO_x、HC 和 CO。

表 4-4 北京市 2008 年电动汽车发展方案一的排放削减

相比同类柴油车的排放量削减（吨	HC	CO	NO _x	PM ₁₀
-----------------	----	----	-----------------	------------------

)					
公交车	无轨电车	108.5	432.8	478.2	28.2
	混合动力	11.0	48.6	23.5	2.3
	纯电动	2.7	10.8	12.0	0.7
	燃料电池	0.8	3.2	3.6	0.2
出租车	混合动力	101.2	917.6	50.4	0.8
政府用车	混合动力	77.1	697.8	40.0	0.6
总计 (吨)		526.8	2110.9	607.6	32.9
相比基准方案总排放量的削减比例		0.6%	0.3%	1.1%	1.6%

相关的增加投资和运营成本如表 4—5 中所示。

表 4—5 北京市 2008 年电动汽车发展方案一的成本 (万元)

		车辆购置 总投资	车辆购置 增加投资	车辆运营 总成本	车辆运 营增加 成本	基础设 施建设 投资	基础设 施维护 成本	总成本	增加 成本
公交车	无轨电车	6800	—	8257	-1177	4200	—	19257	3023
	混合动力	5300	1300	3448	-386	—	—	8748	914
出租车	混合动力	15000	5000	8490	-2350	—	—	23490	2650
政府用车	混合动力	30000	4000	6367	-1762	—	—	36367	2238
总计		57100	10300	26562	-5675	4200	—	87862	8825

表 4—5 中没有给出纯电动车和燃料电池车的成本，一是它们的数量很少，二是它们已经有比较明确的政府规划和资金使用方案，所以这里不再讨论。

4.2.3 电动汽车发展方案二

对公交车实行和方案一相同的发展规划。

对于在轿车中应用混合动力技术，考虑加大推广的力度。计划在出租车中发展 2000 辆混合动力轿车，在政府用车中也加大推广的范围，使其达到 4000 辆。

方案二的具体发展规划如表 4—6 所示，从上到下代表了发展的优先程度。

表 4-6 北京市 2008 年电动汽车发展方案二

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	18000	无轨电车	800	4.4%
		混合动力	100	0.6%
		纯电动	20	0.1%

		燃料电池	6	0.0%
出租车	65000	混合动力	2000	3.1%
政府用车	—	混合动力	4000	—

按照上面提出的方案，根据(3-6)式计算各类车辆的排放削减量，着重强调引入电动汽车后单车排放因子的变化。

表4—7给出2008年电动汽车发展方案一对机动车排放的削减结果。可以看出，方案二对于北京市2008年机动车常规污染物排放的削减效果，绝对量由高至低依次为CO、HC、NO_x和PM₁₀，相对比例由高至低依次为PM₁₀、NO_x、HC和CO。

表4—7 北京市2008年电动汽车发展方案二的排放削减

相比同类柴油车的排放量削减（吨）		HC	CO	NO _x	PM ₁₀
公交车	无轨电车	108.5	432.8	478.2	28.2
	混合动力	11.0	48.6	23.5	2.3
	纯电动	2.7	10.8	12.0	0.7
	燃料电池	0.8	3.2	3.6	0.2
出租车	混合动力	202.4	1835.2	100.8	1.6
政府用车	混合动力	154.2	1395.6	80.0	1.2
总计（吨）		705.1	3726.3	698.0	34.3
相比基准方案总排放量的削减比例		0.8%	0.5%	1.2%	1.7%

相关的增加投资和运营成本如表4—8中所示。

表4—8 北京市2008年电动汽车发展方案二的成本（万元）

		车辆购置 总投资	车辆购置 增加投资	车辆运营 总成本	车辆运营 增加成本	基础设施 建设投资	基础设施 维护成本	总成本	增加成本
公交车	无轨电车	6800	—	8257	-1177	4200	—	19257	3023
	混合动力	5300	1300	3448	-386	—	—	8748	914
出租车	混合动力	30000	10000	16980	-4700	—	—	46980	5300
政府用车	混合动力	60000	8000	12734	-3524	—	—	72734	4476
总计		102100	19300	41419	-9787	4200	—	147719	13713

4.3 对国内发展混合动力技术的一点建议

如前所述，从欧美日等发达国家的电动车发展历程来看，纯电动车技术正逐渐推出市场，燃料电池技术还处于研究示范阶段，离商业化还比较远，而近

年来发展最为迅速的是混合动力技术。

✧ 重型车

对于在公交车队中应用混合动力技术，目前国外也尚未做到产业化，技术成本还很高，所以在国内应用可有两种途径：

- 一、从美国购买 5 辆左右价格昂贵的整车，学习其技术，争取尽快国产化；但对方考虑到知识产权和技术壁垒问题，可能不愿意做这样的小规模生意；
- 二、国内从头进行逐步的技术研究开发，先可以考虑学习巴西圣保罗的经验，将现有公交车改造成简单的混合动力车（至少在减少怠速油耗和排放方面比较有效），然后再研究更为先进的技术，但这个周期较长，预计到 2008 年还不会有大的突破，需要从长远的战略角度考虑。

✧ 轻型车

混合动力轻型车商业化的速度之快，超出了很多人的预料。在国内的轻型车上应用混合动力技术，可以要求日本或美国的大汽车厂商直接从本土向中国出口混合动力轿车，但这种做法对中国几乎没有好处。因此，比较好的做法是制定相关的政策，以国内飞速增长的轿车需求市场为动力，鼓励汽车厂商将技术移植到中国，至少是将他们的混合动力轿车装配线搬到中国，以降低生产成本，而国人可逐渐学到这些先进技术。如果从长远一点考虑，由于中国的生产成本相对较低，今后还可能将在国内生产的混合动力车出口到欧美等国。

✧ 关于“电池大王”王传福的电动汽车计划

从美国纯电动车的发展过程看（大汽车厂商也是找知名的电池生产商帮他们解决汽车电瓶的问题），其前景比较悲观。镍氢电池虽然在动力性能和储能两个最主要因素上都不错（铅酸电池动力性能好，但储能效率低），但让一直使用内燃机的人们改用电动车，短期内还不太可能做到大规模，而且国内现在的电力供应也出现紧张，交通部门不易再提高负荷。一个建议是，比亚迪公司既然拥有比较先进的蓄电池技术，何不将其用在混合动力车上？这样既保持了自己的优势，也能通过和汽车厂商共同合作而进入汽车市场。

（注：本节的建议来自与美国阿冈国家实验室交通研究中心王全录研究员的个人交流，王全录博士是汽车技术、交通能源与环境研究领域的权威专家，现任美国能源基金会董事会董事等职）

参考文献

- [1] 混合动力车将成我国电动汽车产业化的突破口. 东方网,
<http://www.eastday.com/>
- [2] 石明山, 徐海, 于柏. 直接甲醇燃料电池研制获突破. 科学时报, 2002.9.27
- [3] 中国汽车新网, <http://www.chinaev.com.cn>. 2002.4.23
- [4] Hal Harvey and Joe Ryan. Hybrid buses: the Brazilian experience. Hybrid vehicle technology workshop, Beijing, Nov. 2003

第五章 北京市生物质燃料车发展规划研究

生物质燃料车在北京基本没有实际的应用。到目前为止，只有几辆醇类燃料公交车作为试点在开展研究。本章将同样首先考察国内外生物质燃料车的发展情况和经验教训，然后根据北京市的实际情况和发展条件，提出未来生物质燃料车的发展规划。

5.1 国内外生物质燃料车的发展情况研究

5.1.1 国外的发展情况研究

甲醇在 1980 年代早期是被用作汽油中低含量(5%或更少)的混合溶剂，在美国、加拿大和欧洲等地使用，后来随着甲基叔丁基醚(MTBE)的广泛使用，这种低比例甲醇的混合汽油逐渐退出市场。八十年代后期到九十年代早期，甲醇的应用形式发生了变化，北美的一些地区（主要是加州和加拿大西部）开始在轻型车上应用 M85 的混合汽油(即 85%甲醇+15%汽油)，市场上出现了使用汽油、M85 或任意比例混合汽油的灵活燃料车(FFV)，而在柴油机上，为保证动力性，使用的是纯甲醇(M100)。1997 年 FFV 的数量达到最多，全美有 2.1 万辆左右，此后便开始减少，目前 FFV 已经停止生产。使用 M100 的车辆数在 1994 年达到最多，为 415 辆，此后便开始减少。甲醇年消耗量的变化趋势与此相同，1994 年 M85 和 M100 的消耗量分别达到 234 万和 319 万加仑(汽油当量，下同)的最大值，此后便逐年减少，到 2002 年，M85 的消耗量只有 34 万加仑，M100 则完全不再使用(DOE EIA, 2004)。甲醇燃料逐渐退出市场的主要原因，是汽、柴油车的排放控制技术发展迅速，使用甲醇燃料和使用汽、柴油的车辆相比，在污染物排放削减上越来越没有优势。此外，1994—1995 年前后甲醇价格上升，其低能量密度（只有汽油的 1/2）导致续驶里程短或燃料储罐体积大，腐蚀特性要求使用专门的燃料系统等，都使得甲醇燃料在市场上缺乏竞争力。使用甲醇燃料还可能导致更多的甲醇和甲醛排放(甲醇毒性中等，可经呼吸道和皮肤等进入体内，为神经毒物，有明显的麻醉作用，特别对视神经、视网膜有特殊选择作用，反复接触中等浓度甲醇可致暂时或永久性视力障碍和失明，急性中毒后果严重，往往造成死亡，根据动物实验结果推至人在接触 $39.3\text{—}65.5\text{g/m}^3$ 的

甲醇蒸气中 30—60 分钟是危险的；甲醛是有刺激性的气体，对眼睛和呼吸系统有刺激性作用，高浓度时会引起咳嗽、胸痛、恶心和呕吐，它已被世界卫生组织确认为可疑致癌物质，有致癌和致畸形的作用）。在重型车上使用纯甲醇燃料，除上述普遍的问题外，M100 在低温环境下难以启动（这个问题在使用 M85 时不存在），只能通过批发获得等等，都是导致其应用越来越少的因素。

乙醇在巴西和美国被广泛用作燃料，在加拿大和一些欧洲国家则得到有限的使用。巴西是目前世界上最大的燃料乙醇生产国和消费国，燃料乙醇在巴西的应用始于 20 世纪初，1930 年时乙醇—汽油混合燃料的使用就具备了一定规模。从 1975 年起，出于国家能源安全和发展战略的考虑(当时巴西 80%的燃料依赖进口)，同时为促进农业和种植业的发展，以及开发清洁可再生能源和保护环境的目地，巴西开始大力发展燃料乙醇的行动。目前巴西年产乙醇 1000 万吨左右，约 300 万辆汽车完全使用燃料乙醇，而其余车辆则使用 22%燃料乙醇和 78%汽油的混合燃料，巴西是世界上唯一不供应纯汽油的国家。甘蔗几乎是巴西唯一的燃料乙醇生产原料，种植的甘蔗有 65%用于生产乙醇，而生产的乙醇中有 97%作为燃料。

美国也是燃料乙醇的主要生产国之一，二十世纪七十年代的世界石油危机和 1990 年 11 月通过的清洁空气法修正案(Clean Air Act Amendment, 简称 CAAA)以后，是美国燃料乙醇发展的两个主要时期。1978 年以后，美国政府大力推广 E10 的乙醇—汽油燃料(即乙醇含量为 10%)，乙醇工业发展迅速，CAAA 要求从 1992 年冬季开始，美国 39 个 CO 排放超标地区必须使用含氧量 2.7%的汽油(相当于添加 7.7%的无水乙醇)，而从 1995 年开始，9 个臭氧浓度超标地区须使用新配方汽油。目前，全美使用的汽油中约有 1/3 为新配方汽油，而 8%的新配方汽油使用无水乙醇添加剂。此外，美国在 1990 年代初也开始引入用于灵活燃料车的 E85(85%乙醇)及用于重型车的 E95、E100(95%乙醇和 100%乙醇)等燃料。使用乙醇燃料也容易导致更多的乙醇和乙醛排放(乙醛属低毒性物质，高浓度时有麻醉作用)，但其对环境和人体健康的影响不大，E85 在美国的价格和中等无铅汽油相当，燃料供应体系已初具规模，而 E95 的价格很难与低廉的柴油竞争，且只有通过批发购买，因此推广的阻力很大。从美国近十年的燃料乙醇消耗量来看，作为汽油添加剂的乙醇使用量稳步增长，从 1995 年的 9.1 亿加

仑增加到2002年的约14.1亿加仑,占燃料乙醇总消耗量的绝大部分;E85由1995年的19万加仑(汽油当量,下同)迅速增加到2002年的1778万加仑,但仍不到燃料乙醇总消耗量的1.3%,而E95从1996年的270万加仑开始减少,2001年后完全退出市场。作为一项支持农业发展的政策,燃料乙醇在美国的推广应用是比较成功的。

表5-1给出了美国醇类燃料车保有量的发展趋势。

表5-1 1995-2004年美国醇类燃料车保有量(辆)

燃料类型	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
M85	18,319	20,265	21,040	19,648	18,964	10,426	7,827	5,873	4,917	4,592
M100	386	172	172	200	198	0	0	0	0	0
E85	1,527	4,536	9,130	12,788	24,604	87,570	100,303	120,951	133,776	146,195
E95	136	361	347	14	14	4	0	0	0	0

注: (1) 斜体字为预测值;

(2) M85: 甲醇与汽油体积比例分别为85%和15%的混合燃料, 下同;

(3) E85: 乙醇与汽油体积比例分别为85%和15%的混合燃料, 下同;

(4) E95: 乙醇与汽油体积比例分别为95%和5%的混合燃料, 下同;

由表5-1可以看到, 从1995年以来, 使用E85的灵活燃料车在美国有较大的发展; 与之相反, 使用M85、M100和E95的车辆数量逐年下降, M100和E95在2001年已被完全淘汰。需要补充说明的是, 由于一些汽车生产商从1997年开始在生产线上增加了使用E85燃料的功能, 根据美国能源部能源信息处(DOE EIA)的估计, 2000年全美可使用E85、汽油或两者混合物的灵活燃料车数量达到265万辆, 但实际上其中大部分车辆都被当作传统汽油车销售和使用, 表5-1中给出的数据只包括被认为是用作替代燃料车的E85车辆, 仅为前者的3.3%。

美国是最早研究生物柴油的国家。圣路易斯市为达到能源部的综合能源政策方案(EPACT)的要求, 于1999年底在市内的车辆上试用了B20的混合柴油(即20%的生物柴油+80%的普通柴油)。虽然生物柴油的价格相比其它替代燃料如CNG和LPG要高, 但其在设备、基础设施和培训等方面的前期投资要小得多。根据研究人员所做的经济分析, 对于运行相同里程的公共汽车, 使用甲醇、天然气、B20的混合柴油和普通柴油的费用依次降低, 但使用前三种替代燃料

有助于减少 PM 等污染物的排放。不过，已有的测试数据表明，使用 B20 相比使用普通柴油，其对车辆 PM 排放的削减最多为 15%，随着柴油车排放控制技术的迅速发展、污染物排放的大幅降低，两者之间的差别也越来越小。生物柴油的使用，更多是从能源结构调整的角度考虑，环境效益则不明显；同时，燃料成本会有一定的增加，一般情况下政府会给予减免税等财政补贴政策。

生物柴油在欧洲比较商业化，德国、法国、意大利、奥地利、比利时、丹麦、匈牙利、爱尔兰以及西班牙都有生物柴油的生产厂或中试厂，其中德国、法国、意大利、丹麦、爱尔兰和西班牙对生物柴油都不征税，这可能得益于欧洲支持农业发展的政策。意大利是目前欧洲使用生物柴油最广的国家，生物柴油的年产量达到 75 万吨。在德国，奔驰、宝马、大众和奥迪等汽车厂家生产的汽车均允许使用生物柴油，而免税政策使得生物柴油的加油站零售价格比普通柴油低 0.15 马克/升，提高了其在市场上的竞争力。生物柴油在日本也有一定的应用，目前日本的生物柴油生产量达到 40 万吨/年。另外，巴西从 2001 年开始利用蓖麻油生产生物柴油，而阿根廷则开始利用本国丰富的向日葵籽和黄豆资源生产生物柴油。

5.1.2 国内应用案例研究

甲醇汽车在我国已有一定的研究和发展。我国对 M15 甲醇掺烧汽油的示范研究，早在“六五”期间就由国家科委组织进行。山西省曾进行过 475 辆 M15 汽车和 4 个加油站的商品化示范运行，但由于 M15 燃料中需添加防止燃料分层的助溶剂，在我国不易获得，所以从“七五”以后开始转向高比例甲醇的试验研究。到目前为止，甲醇汽车技术和有关支持系统的技术问题都已基本解决，甲醇汽车也经过了长时间的路试考验，其中桑塔纳甲醇汽车累计行驶里程达 100 多万公里，目前仍有三辆车在行驶，单车最长行驶里程已有 16 万公里，性能保持良好。山西省正在进行高比例甲醇(M85, M100)汽车的系统工程示范，前期有 50 辆左右的国产甲醇中巴车投入商业运行，现在主要转向对在用车的改造。我国现有甲醇生产能力为 250 万~300 万吨/年，1998 年产量为 180 万吨。山西省进行的利用煤制甲醇发展甲醇燃料车示范工程，目前已通过国家鉴定并由试验阶段转入产业化阶段。

乙醇作为燃料在汽车上的使用技术和甲醇基本相同，难度还更小一些。我国现有乙醇生产能力 500 万吨，产量为 170 万吨/年。但目前乙醇的价格为 4000～5000 元/吨，是推广的主要障碍。在我国进入世贸组织以后，由于农业面临的巨大冲击，同时原油的进口日趋增加，以及环保压力日益加大，国家已经将推广使用车用乙醇汽油作为一项重要的战略性举措。国家计委日前正在抓紧组织编制《车用乙醇汽油“十五”发展专项规划》，准备短期内以陈化粮为主开展燃料乙醇的试点项目，今后在推广时将考虑使用商品粮来作为变性燃料乙醇生产的原料。在黑龙江、吉林、河南和安徽等地，都有变性燃料乙醇的生产项目。2002 年 6 月，河南郑州、洛阳、南阳三市开始强制性推广乙醇汽油燃料；2003 年 3 月，哈尔滨市也开始进行乙醇汽油燃料的试点；而在 2004 年初，国家发改委则会同公安部、财政部等 8 部委发出通知，将车用乙醇汽油的试点范围从原来的 5 个城市扩大到 9 个省，这些省份将在 2005 年底基本实现用含有 10%乙醇的车用乙醇汽油代替普通汽油。然而在实际使用过程中，乙醇汽油还存在一些问题，虽然国家的补贴政策使得乙醇汽油的价格和普通汽油持平，但公众对其缺乏了解，很多人反映乙醇汽油存在动力性较差、耗油量较大，甚至可能对发动机造成损害等问题。国内部分地区（如河南）为降低醇类燃料的应用成本，在未经改造的汽油发动机上直接使用乙醇燃料，出现了燃料与发动机性能不匹配而导致燃烧效率明显下降、排放增加和材质损坏的情况。另外，由于国内醇类燃料尚未形成足够的市场，车辆在使用过程可能需要反复更换燃料，更易造成车辆的损坏，增加维护费用。因此，推广乙醇汽油，不易操之过急，应通过进一步的试点或示范工程，给公众更多试用和了解的时间；在改进技术和燃料特性的同时，也可考虑加大财政补贴的力度，借燃油税政策出台的机会，促使乙醇汽油的零售价格低于普通汽油，以提高其市场竞争力。

5.2 2008 年生物质燃料车发展方案规划

目前技术比较成熟的醇类燃料车为 M85/E85 灵活燃料车，表 5—2 给出了 DOE 对这两种车型的排放测试结果：

表 5—2 甲醇/乙醇灵活燃料车排放测试

排放因子(g/mile)	道奇汽车	福特汽车
--------------	------	------

	M85	汽油车	E85	汽油车
CH ₃ CHO	0.0002	0.0004	0.0103	0.0002
CH ₄	0.0165	0.0237	0.0293	0.0130
CO	1.03	0.874	1.246	1.271
CO ₂	409.8	451.6	404.8	430.7
HCHO	0.0164	0.0016	0.0023	0.0009
NMHC	0.3254	0.1087	0.0883	0.0982
NO _x	0.122	0.154	0.115	0.105
OMHCE	0.1083	-	0.1323	-
OMNMHCE	0.1134	-	0.1072	-
THC	0.0173	0.1277	0.1238	0.1086
CH ₃ CH ₂ OH	-	-	0.0892	-
CH ₃ OH	0.1951	-	-	-
燃油经济性(MPG)	11.782	19.218	15.241	20.115

注：OMHCE: Organic material hydrocarbon equivalent 有机物碳氢当量；

OMNMHCE: Organic material non-methane hydrocarbon equivalent 有机物非甲烷碳氢当量。

由上表中结果可见，同汽油车相比灵活燃料车的常规污染物排放，如 CO、NO_x 和 NMHC，并未有明显的削减，甚至某些污染物排放还有一定升高；而另一方面，使用 M85 导致甲醛和甲醇等有毒物质的排放显著增加，使用 E85 也大大增加了乙醛、乙醇和甲醛的排放。由此可见，醇类燃料车的排放削减效果不理想，甚至可能带来较大的负效应。此外，甲醇/乙醇车的燃料经济性也不及同类汽油车，加上燃料成本较高，导致燃料费用大大上升。

2004 年 1 月，北京市街头有 5 辆甲醇和乙醇公交车投入试运行。目前还缺乏足够的数据来对其应用效果进行全面和客观的评估，但从 5.1.1 节中国外的经验来看，应用醇类燃料公交车可能遇到燃料供应问题、发动机系统匹配问题等较多的困难和阻力。由于目前北京市甲醇和乙醇燃料的供应也不易保证，**无论是从削减机动车排放的角度，还是从燃料使用的可靠性来考虑，近期内在北京市引入醇类燃料车是不合适的。**

如果从能源战略的角度出发，可以先在部分醇类燃料充足的地区（如山西、河南等地）进行试点工程的研究和关键技术的改进，等技术比较成熟和市场条件逐渐完备时，再在一定范围内加以推广。另外，将甲醇作为添加剂，以较小的比例（5%左右）加入到汽油中是可行的，但如果比例增加到 15%以上，就会出现明显的分层，使用不安全。将乙醇作为添加剂，以较小的比例（15%以下）加

入到汽油中，虽然在排放削减上没有太大的效果，但由于对汽油车的发动机和燃料供应系统无改造要求，因而也是在交通领域引入可再生能源的一个选择。不过，公众对一种新的燃料都需要一个逐渐了解和接受的过程，大范围地推广乙醇汽油燃料，也不宜操之过急，以免带来负面效应。

对于生物柴油而言，从第二章的费效分析可以看到，其应用对机动车尾气 PM 和 NO_x 排放的削减效果很小。况且，美国车辆使用的生物柴油是由大豆制造的，而如果在北京应用生物柴油，可能是用油渣炼制而成，品质很难保证，使用时甚至会导致机动车排放的劣化。鉴于生物柴油和醇类燃料一样，在北京没有充足和稳定的来源，从削减机动车排放的角度和燃料使用的可靠性两方面来考虑，近期内在北京市推广车用生物柴油是不合适的。

对于北京市 2008 年替代燃料车发展规划，上面确定了不宜发展生物质燃料车（主要指醇类燃料车和生物柴油车）。但对北京市中长期的交通发展规划来说，发展可再生的生物质燃料仍然是一个重要方面，下面将就北京市 2020 年替代燃料车的发展规划展开一定的讨论，提出粗略的发展方案。考虑到 2020 年的发展预测存在很多不确定性，这里将燃气汽车、电动车和生物质燃料车放在一起讨论，而不再分开进行详细论述。

5.3 北京市 2020 年替代燃料车发展规划

随着机动车排放控制技术的日益提高，排放标准和控制措施的不断加严，可以预计到 2020 年，汽/柴油车的排放将达到相当低的水平。此时的替代燃料车发展规划，主要出发点将是能源结构调整和节约能源，兼顾机动车排放的削减，因此天然气和可再生能源、车辆节能技术是发展规划的重点。

5.3.1 基准方案（BAU）排放量预测

根据对 2020 年北京市机动车发展预测结果，得到当年北京市各类机动车分车龄保有量预测，排放控制水平按照 2008 年、2012 年新车分别实施欧洲 4 号 and 更严格的机动车排放标准，在用车于 2011 年开始实施更为严格的检查/维护制度（IM240）的发展趋势。利用 MOBILE5 和 PART5 计算得到 2020 年机动车各种污染物的排放因子，结果如下：

表 5—3 北京市 2020 年各车型机动车排放因子

污染物 (g/km)	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC
HC	0.55	0.59	0.66	1.49	0.83	1.89
CO	3.59	4.99	5.26	13.95	3.46	4.00
NO _x	0.12	0.16	0.20	0.62	2.61	0.07
尾气管排放 PM10	0.012	0.017	0.025	0.053	0.143	0.008

进一步计算得到 2020 年基准方案的机动车排放量，如表 5—4 所示。

表 5—4 北京市 2020 年基准方案机动车排放量（单位：吨）

	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	HDDV	MC	总和
HC	20556	5738	4363	2300	2017	10124	45098
CO	133501	48724	34845	21517	8432	21461	268480
NO _x	4619	1548	1338	958	6345	400	15209
PM10*	446	166	166	82	347	43	1249

注：尾气管排放量

将北京市 2000 年、2008 年基准方案和 2020 年基准方案下的机动车污染物排放量进行比较，如图 5-1 所示，可以看出，2020 年各类污染物排放较 2008 年又有显著下降，HC、CO、NO_x 和 PM10 排放的下降比例分别达到 51.3%、63.9%、73.3%和 38.9%。

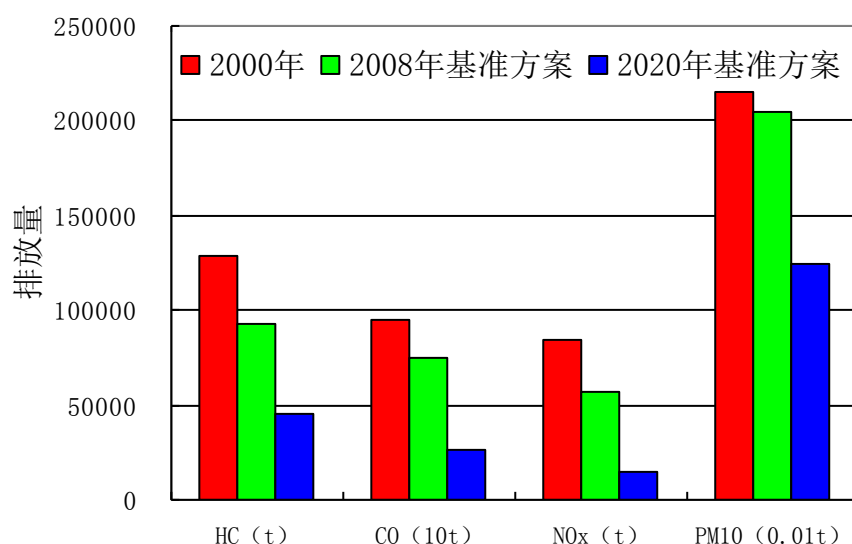


图 5—1 北京市 2000 年、2008 年和 2020 年基准方案机动车排放比较

图 5—2 给出了北京市 2020 年基准方案下各车型对机动车总排放的分担率。

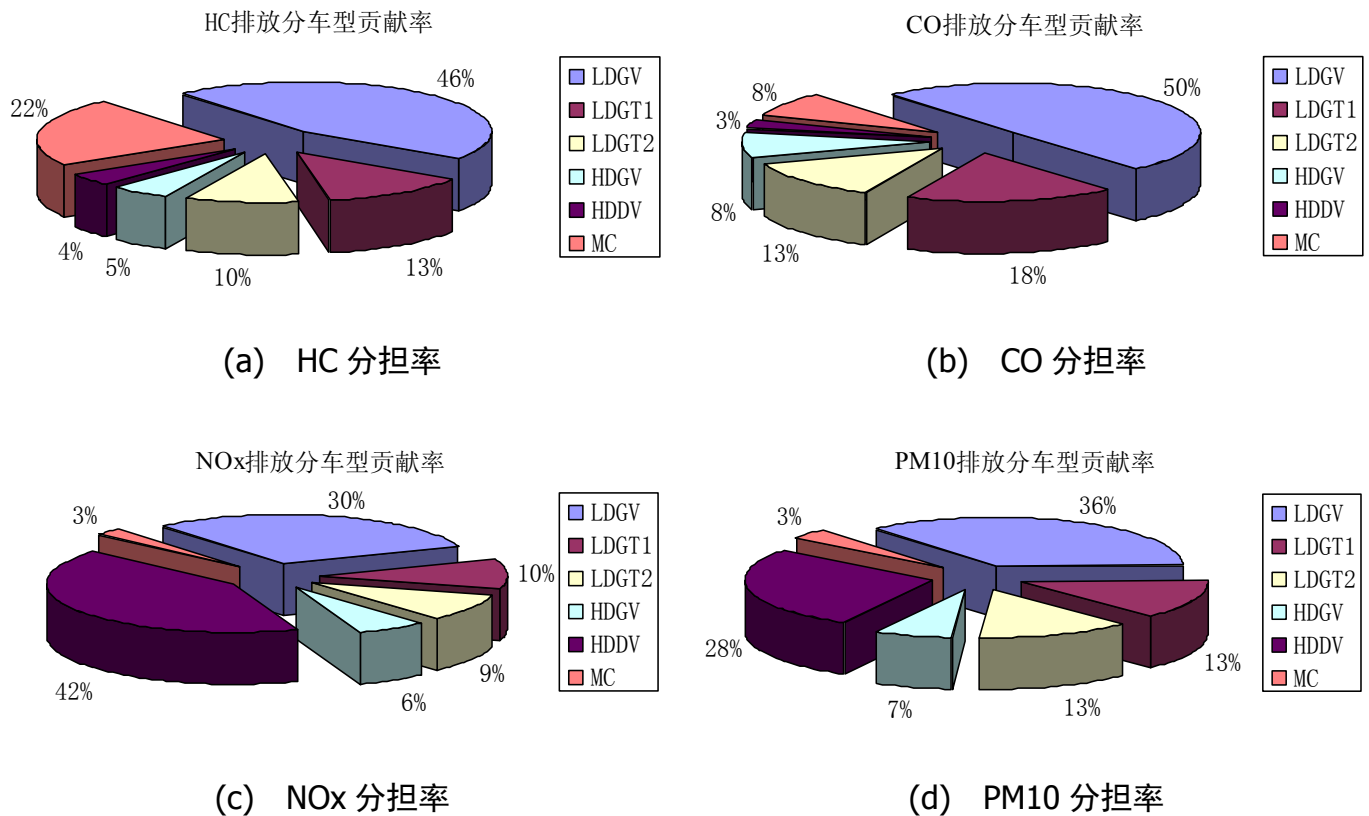


图 5—2 北京市 2020 年基准方案机动车排放分车型分担率

比较图 5—2 和图 3—15，可以发现 2020 年基准方案相比 2008 年基准方案：

- 摩托车在机动车 HC 和 CO 总排放中的分担率有明显的上升，增长了 1 倍左右；轻型汽油车 1 类加 2 类对 HC 和 CO 总排放的分担率有 5%~10% 的减少；其它车型的分担率也有或多或少的变化。由于北京市自 1997 年底实施摩托车不准进入三环以内道路行驶的规定，规划市区内的摩托车数量一直较少，未来的摩托车保有量增长，也主要集中在郊县地区，对市区空气质量的影响相对较小。
- 由于轻型汽油车的排放控制加严力度很大，其对 NOx 总排放的贡献率明显下降；而重型柴油车的分担率则增加了 13%，达到 42%，需要进一步的削减 NOx 排放。另外，摩托车的贡献率也由 2008 年的不到 1% 增加到 3%。
- 重型柴油车对机动车 PM 总排放的分担率有明显下降，减少了 18%；而轿车的分担率明显上升，增加了 13%，这主要是因为轿车数量增加了 67%，而其尾气颗粒物排放很少，没有太大的下降余地。其它车型的分担率则只有 1%—2% 的变化。

5.3.2 替代燃料车发展方案规划

如前所述，替代燃料车的长期发展规划，主要出发点将是能源结构调整和节约能源，兼顾机动车排放的削减。根据政府规划中能源结构的合理化调整，预计到 2020 年，天然气在总能源消耗中的比重将提高到 8%左右，因此天然气汽车是发展规划的一个重点。可再生能源的推广利用是未来可持续发展的重要保证，基于前几章的分析和中国的实际情况，以乙醇汽油的形式引入燃料乙醇是可能性比较大的。另外，从提高燃料使用效率，节约能源的角度出发，混合动力车和燃料电池车也具备较好的发展前景，特别是混和动力轻型车。虽然目前这两种车的制造成本很高，但预计在未来的 10—15 年内会有大幅降低，达到人们能够承受的程度。由于混和动力车一般仍使用传统燃料（也可以使用天然气），在燃料供应系统上不存在障碍；而燃料电池车的氢气供应成本相当高，燃料供应基础设施的建设投资和运营成本非常大，未来的突破点可能是在直接甲醇燃料电池车（DMFCV）或者直接汽油燃料电池车上。

LPG 是目前应用最广泛的车用替代燃料，但正如第一章中提到的，LPG 是炼油过程和生产天然气的副产品，其来源有限，当需求量不断增大时，价格也会上涨，目前国内的一些南方城市已经从东南亚进口车用 LPG。从长期的能源结构调整考虑，LPG 不适宜作为大力发展的燃料，保持现在的水平即可。纯电动车由于电池问题一直未能得到较好的解决，电池使用寿命短导致产生大量的有毒有害固体废物，而目前汽车制造商致力于进一步开发研制纯电动车技术的动力日益下降，让人难以看到问题解决的希望；另一方面，电力本身是二次能源，如果从燃料生命周期的角度考虑，使用火电同样存在化石燃料消耗和污染问题，而使用水电和核电要好一些（在全国电力联网供应的情况下，应该考虑平均水平）。

据此提出一个可能的实施方案，如表 5—5 所示：

表 5—5 北京市 2020 年替代燃料车发展方案

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	20000	单一 CNG	8000	40.0%
		混合动力	4000	20.0%

		燃料电池	1000	5.0%
		无轨电车	1000	5.0%
		重型汽油	2000	10.0%
		重型柴油	4000	20.0%
市政车辆 (环卫车/邮政车)	10000	单一 CNG/LNG	5000	50.0%
		汽/柴油	5000	50.0%
出租车	70000	单一 LPG	20000	28.6%
		混合动力	20000	28.6%
		乙醇汽油	15000	21.4%
		普通汽油	15000	21.4%
私家车/政府用车	2674000	混合动力	500000	18.7%
		乙醇汽油	1087000	40.6%
		普通汽油	1087000	40.7%

注：实际上，使用乙醇汽油和普通汽油的车辆类型是一样的，表中是按照两种燃料的使用比例估算的车辆数。

5.4 发展替代燃料车的一些相关问题

发展替代燃料车会引起能源、交通和科技等众多领域的变动，主要包括能源结构调整、汽车技术进步和机动车排放控制加严等。下面将讨论与发展替代燃料车相关的一些问题。

5.4.1 对制定“清洁燃料车”标准的建议

从 1999 年国家科技部正式启动“清洁汽车行动”以来，到现在共四年多的时间里，国内很多地方和城市都进行了替代燃料车的应用尝试，希望通过使用替代燃料使车队“清洁化”。但事实表明，不少的应用案例效果并不理想，无法保证车辆排放的削减。

就目前的情况而言，大多数地区引入替代燃料是首先从减少机动车排放的角度考虑，即希望使用“更清洁”的汽车，也因此很多时候替代燃料车被等同于“清洁燃料车”。在经历了一些经验和教训，大家开始对这个概念提出了置疑。为了明确“清洁燃料车”的定义，保证排放削减的效果，有必要制定一套相应的标准。鉴于目前国家已经有强制执行的机动车排放标准，北京和上海等地还实施更为严格的地方标准，为避免冲突，“清洁燃料车”标准适宜以自愿

性质的标准形式推出，作为一种辅助手段，通过市场调节来发挥作用。

参考欧洲的经验可以发现，这种形式的清洁汽车标准已经被应用。在欧洲 3 号排放标准推出的时候，对于重型发动机，同时也提出了一套“加严型环境友好车辆”（Enhanced Environmental Friendly Vehicles, EEVs）标准。这套标准在相同的测试循环下，限值比欧 3 标准要低，甚至有些限值低于欧 4 和欧 5 标准。在第三章表 3—16 中已经列出 EEVs 标准的部分限值，这里给出更全的标准：

表 5—6 欧洲 EEVs 排放标准（单位：均为 g/kWh）

	测试循环 ^a	CO	HC	NMHC	CH ₄ ^b	NO _x	PM	Smoke
重型柴油机	ESC&ELR	1.1	0.25	—	—	2.0	0.02	0.15
重型发动机	ETC	2.2	—	0.40	0.65	2.0	0.02	—

注：a. ESC—European Stationary Cycle; ELR—European Load Response; ETC—European Transient Cycle

b. 甲烷限值仅针对天然气发动机

该标准并非只针对替代燃料发动机，而同样适用于传统的重型发动机。然而，从某些污染物的限值可以看出，目前的技术下使用替代燃料更容易达到此标准。例如，ETC 测试循环下的 PM 排放限值为 0.02g/kWh，目前欧 3 标准中的相应限值为 0.16g/kWh，前者只有后者的 1/8，对于达到欧 3 标准的重型柴油机而言，要进一步达到 EEVs 标准，还有相当大的难度；但由于天然气发动机和 LPG 发动机的颗粒物排放很低，达到 EEVs 的 PM 排放限值要容易得多。欧盟环境部长会议设立这项标准，主要是为了通过它来实施一些经济和政策上对替代燃料车（主要是 CNG 和 LPG 车）的鼓励措施，比如在车辆排放达到 EEVs 标准的情况下，给予购车补贴等。当然，如果传统的柴油车排放达到了这个标准，同样可以享受购车补贴，但目前达到该标准的柴油车技术，成本增加也很高，未必能在和替代燃料车的竞争上占据优势。

不过，如果比较 EEVs 标准和欧洲 4 号标准，可以发现它们之间的差距比起欧 3 标准减小了很多，尤其是 PM 排放限值。欧 4 标准中，ETC 测试循环下重型发动机的 PM 排放限值为 0.03g/kWh，和 EEVs 已非常接近；差距较大的是 NO_x 排放限值，欧 4 和 EEVs 标准分别为 3.5g/kWh 和 2.0g/kWh，两者比值为 1.75，但相比于欧 3 标准中的 5.0g/kWh（和 EEVs 标准中 NO_x 排放限值的比值为 2.5

），已经缩小了不少。

鉴于北京市正在考虑进一步引入欧洲 3 号机动车排放标准，如果同时引入 EEVs 标准，作为国内的“清洁燃料车”标准，由于属于同一套标准体系，在测试方法上完全相同，则操作起来将比较容易实行。

美国也从 1998 年开始实施“清洁燃料车”的排放标准，但方式与欧洲有所不同。其中，“清洁燃料车”就是指达到联邦低排放认证标准中任何一项的车辆，该标准共包括四项：低排放车标准（LEV）、天然低排放车标准（ILEV）、超低排放车标准（ULEV）和零排放车标准（ZEV）。其部分限值已在第三章表 3—16 中列出，这里不再重复。由于该标准采用 EPA 的瞬态测试规程，且体系比较复杂，和国内一直以来采用的欧洲标准体系相差较大，如果引入，遇到的困难会比较大。

5.4.2 替代燃料的零售价格

总结国内的一些应用案例中，可以发现燃料零售价对驾驶者使用该燃料的积极性影响非常大，很多时候，驾驶人员会根据单位行驶里程的燃料费用来决定是否选用该种燃料。在进行费用效果分析时，除了燃料费用外，还需要考虑车辆购买成本、维护费用，甚至从政府部门的角度去考虑基础建设投资。但对于车辆驾驶者而言，在对车辆购置成本和维护要求有了感性的认识后，根据燃料费用来判断使用某种燃料是否经济，是最为直观的办法。

因此，这里仅根据单位里程的燃料费用，提出几种替代燃料的最高可接受零售价格，并和目前北京市及全国的价格进行比较。单位里程的燃料费用等于燃料经济性和燃料零售价格的乘积，在第二章的费用效果分析中研究已经得到相关结果，再进一步计算，就能给出最高可接受零售价格，见表 5—7。

表 5—7 几种替代燃料的零售价格

	CNG（RMB/m3 ）	LPG（RMB/l）	乙醇（RMB/l）	
	重型车 ^a	轻型车	重型车	轻型车
最高可接受零售价	1.94	1.97	1.95	2.72
目前北京售价	2.40	2.20	N/A	

目前全国平均售价	2.02	2.04	4.50 ^b
----------	------	------	-------------------

注：a. 重型车是和同类柴油车比较，轻型车是和同类汽油车比较

b. 甲醇和乙醇的零售价格是根据调研资料估算的，未能找到实际价格

可以看到，北京市目前的 CNG 和 LPG 价格还有下降的余地，现在的价格不足以和传统汽、柴油竞争。乙醇的价格现在太高，需要下降 50%左右，才有和汽、柴油竞争市场的潜力。

参考文献

- [1]潘奎润. 甲醇燃料汽车的发展和评价. 商用汽车, 1999, 6: 6~10
- [2] St. Louis Biodiesel Pilot Program—evaluating the feasibility of using biodiesel to meet EPACT requirements,<http://www.biodiesel.org>
- [3] Railroad Commission of Texas. Additional Information Facts on Alternative Fuels. Alternative Fuels Data Centre 2000
- [4] 黄治玲. 燃料乙醇产业的全球发展概况. 化工管理, 2002, 3: 34~35
- [5] 胡志远, 浦耿强, 王成焄. 车用燃料乙醇的应用与发展. 汽车科技, 2002, 4: 9~11
- [6] 谭天伟, 王芳, 邓立, 徐家立, 王雨娟. 生物柴油的生产和应用. 现代化工, 2002, 2: 4~6
- [7] 忻耀年, B. Sondermann, B. Emersleben. 生物柴油的生产和应用. 中国油脂, 2001, 26(5): 72~77
- [8] 山西省甲醇汽车将转入产业化. 人民网, <http://www.unn.com.cn>
- [9] Emission Standards: European Union, Heavy-Duty Diesel Truck and Bus Engines. <http://www.dieselnet.com/index.html>
- [10] Air Pollution Information: Clean Fuel Fleet Program. <http://www.epa.state.il.us/air/clean-fuel-fleet/>
- [11] 全国清洁汽车行动协调领导小组办公室. 全国清洁汽车行动工作简报, 第22期. 2003年6月

第六章 发展替代燃料车的环境影响研究

第三章—第五章已经给出北京市 2008 年和 2020 年替代燃料车发展方案下，各种替代燃料车的污染物排放削减效果。但由于同人体健康和生活质量等直接相关，空气质量才是人们最关心的话题。本章将讨论机动车排放减少能够给北京市空气质量带来多大程度的改善，主要反映为污染物环境浓度的下降程度，包括全北京市的大气污染物年均浓度水平和重点街区的路边浓度比较；此外也会涉及发展替代燃料车可能带来的其它环境影响。

6.1 不同发展方案的污染物排放削减效果

6.1.1 2008 年替代燃料车发展方案一

方案一的具体规划汇总如表 6—1 所示，从上到下代表了发展的优先程度。

表 6—1 北京市 2008 年替代燃料车发展方案一

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	18000	单一 CNG（新）	2500	13.9%
		单一 CNG（旧）	2000	11.1%
		无轨电车	800	4.4%
		混合动力	100	0.6%
		纯电动	20	0.1%
		燃料电池	6	0.0%
市政车辆 （环卫车）	8000	单一 CNG	1500	18.8%
		单一 LNG	1500	18.8%
出租车	65000	单一 LPG	20000	30.8%
		混合动力	1000	1.5%
政府用车	—	混合动力	2000	—

表 6—2 给出了 2008 年替代燃料车发展方案一对机动车排放的削减结果汇总。可以看出，方案一对于北京市 2008 年机动车常规污染物排放的削减效果，相比 2000 年的削减比例由高至低依次为 NO_x、HC、CO 和 PM₁₀，最高的 NO_x 削减比例为 35.1%，最低的 PM₁₀ 削减比例为 13.4%；相比 2008 年基准方案，排放削减的比例由高到低依次为 PM₁₀、NO_x、CO 和 HC，最高的 PM₁₀ 削减比例

为 8.6%，最低的 HC 削减比例为-0.2%（即 HC 排放相比基准方案稍有增加，这主要是天然气汽车的甲烷排放造成的）。结果表明，方案一的减排效果基本令人满意。

表 6—2 北京市 2008 年替代燃料车方案一排放削减

	HC	CO	NOx	PM10
排放量（吨）	92902	739843	54518	1861
相比 2000 年削减量（吨）	35763	204869	29539	287
相比 2000 年削减比例（%）	27.8	21.7	35.1	13.4
相比 2008 年基准方案削减比例（%）	-0.2	0.5	4.4	9.1

6.1.2 2008 年替代燃料车发展方案二

方案二的具体规划汇总如表 6—3 所示，从上到下代表了发展的优先程度。

表 6—3 北京市 2008 年替代燃料车发展方案二

应用领域	保有量	车型	数量	占保有量的%
公交车	18000	单一 CNG（新）	5000	27.8%
		单一 CNG（旧）	2000	11.1%
		无轨电车	800	4.4%
		混合动力	100	0.6%
		纯电动	20	0.1%
		燃料电池	6	0.0%
市政车辆 （环卫车）	8000	单一 CNG	1500	18.8%
		单一 LNG	1500	18.8%
出租车	65000	单一 LPG	20000	30.8%
		混合动力	2000	3.1%
政府用车	—	混合动力	4000	—

表 6—4 给出了 2008 年替代燃料车发展方案二对机动车排放的削减结果汇总。可以看出，方案二对于北京市 2008 年机动车常规污染物排放的削减效果，相比 2000 年的削减比例由高至低依次为 NO_x、HC、CO 和 PM₁₀，最高的 NO_x 削减比例为 36.2%，最低的 PM₁₀ 削减比例为 18.0%；相比 2008 年基准方案，排放削减的比例由高到低依次为 PM₁₀、NO_x、CO 和 HC，最高的 PM₁₀ 削减比例为 13.2%，最低的 HC 削减比例为-0.2%（即 HC 排放相比基准方案稍有增加，

这主要是天然气汽车的甲烷排放造成的)。结果表明，方案二的减排效果比较令人满意。

表 6—2 北京市 2008 年替代燃料车方案一排放削减

	HC	CO	NOx	PM10
排放量（吨）	92962	737074	53666	1762
相比 2000 年削减量（吨）	35704	207638	30392	386
相比 2000 年削减比例（%）	27.7	22.0	36.2	18.0
相比 2008 年基准方案削减比例（%）	-0.3	0.9	5.9	13.9

下面是 2008 年替代燃料车发展方案一和方案二相对基准方案的进一步削减比例。

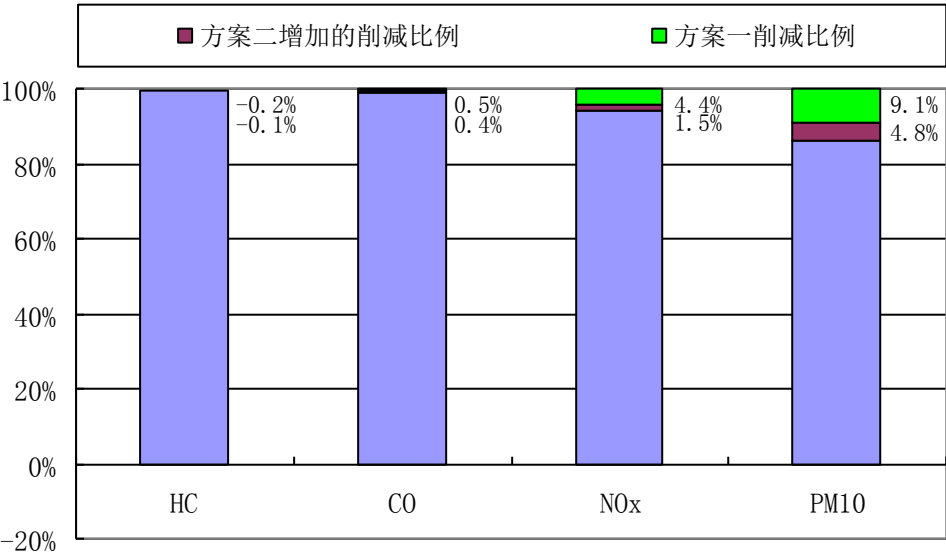


图 6—1 方案一和方案二相比基准方案的进一步削减比例

结果表明，方案一相比基准方案在机动车 PM10 排放的削减上最有成效，NOx 排放的进一步削减效果也有 4.4%，但 HC 和 CO 的进一步削减很少。在方案一的基础上，方案二对机动车 PM10 的排放进一步削减了 4.8%，而 NOx、HC 和 CO 的进一步削减比例都不超过 1.5%，这进一步说明，出于减少机动车尾气颗粒物排放的目的，推广替代燃料车应首先从重型车（尤其是重型柴油车）开始。

6.1.3 2020 年替代燃料车发展方案

从排放削减效果看，尽管 2020 年基准方案下机动车排放已经达到较高的控制水平，但由于替代燃料车发展方案中较大规模引入天然气和混合动力车排放更低的车型，各种常规污染物排放仍有较高比例的削减，具体结果如下表所示：

表 6—3 北京市 2020 年替代燃料车方案排放削减

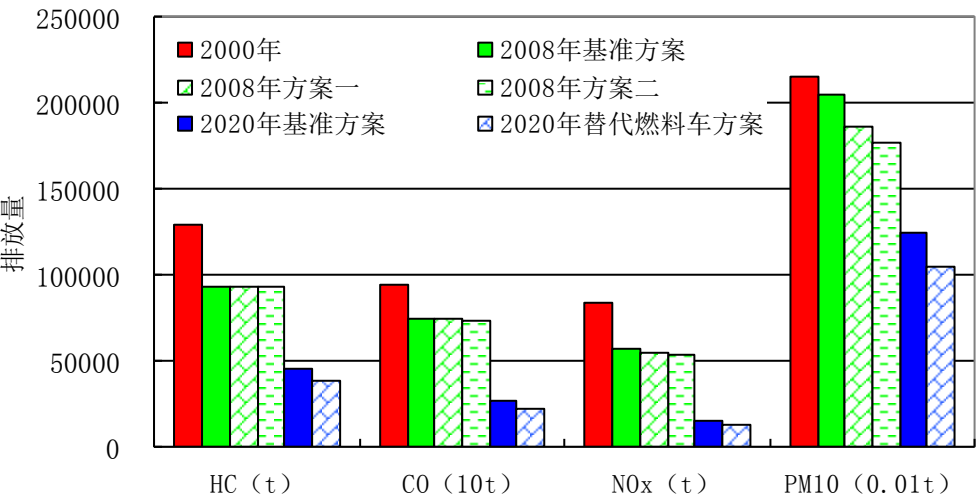
	HC	CO	NOx	PM10
排放量（吨）	38158	219800	13157	1048
相比基准方案削减量（吨）	6941	48680	2052	201
相比基准方案削减比例（%）	15.4	18.1	13.5	16.1

可以看到，相比基准方案，北京市 2020 年替代燃料车发展方案在 HC、CO、NOx 和 PM10 排放上有约 13%~18%的进一步削减，PM10 的削减比例达到 16.1%。

这里需要提到的一点是，就目前的情况而言，使用天然气汽车会导致甲烷排放的增加。由于甲烷是重要的温室气体，从全球气候变化的角度考虑，不能忽视甲烷排放。这个问题已经受到一定的关注，目前已有研究在开发针对甲烷的催化转化设备，相信在不久的未来，天然气的甲烷排放也能较好的控制。

6.1.4 各方案下机动车排放的比较总结

最后，图 6—2 给出了北京市 2000 年、2008 年基准方案、方案一和方案二，



以及 2020 年基准方案和替代燃料车方案下机动车排放的比较。

图 6—2 北京市 2000、2008 和 2020 年机动车排放比较

从图上可以看出，总体而言，尽管北京市机动车保有量从 2000 年的 151 万辆迅速增长到 2020 年的近 500 万辆，但在机动车排放控制水平不断提高、控制措施不断加严的条件下，污染物排放总量仍有显著下降。在 2008 年基准方案已经控制机动车排放总量明显低于 2000 年的基础上，推行替代燃料车方案将能进一步明显减少机动车 PM10 排放，但对 HC、CO 和 NO_x 排放的进一步削减效果不大。对于 2020 年，推行替代燃料车方案对机动车排放的各种常规污染物都能达到一定程度的削减。

6.2 对北京市空气质量改善状况比较

本研究采用大气污染物年均浓度的全市平均值反映北京市空气质量。由于北京市空气质量的监测数据来自从天坛到十三陵、从望京地区到古城地区，以及前门、车公庄等共 12 个常规自动监测站，在时间上做到每日一报，所以从空间和时间上都进行多点的平均后，可以认为该数值反映了北京市空气质量的平均水平。

另一方面，机动车排放属于流动源。对于全北京市而言，虽然大部分的机动车排放集中在规划市区，但随着城区的扩张、中心商业区的逐渐成熟和居住区向郊区迁移等城市布局的变化，车辆行驶的范围必将扩大；另外郊县的发展也会带来当地的机动车保有量和活动水平增加。总体上看，机动车排放将比现在更加分散。

鉴于上述两点，研究决定采用比例下降模型。当时间比尺较长，各种气象条件造成的差别得到平滑，而空间上又是取平均，比例下降模型可以达到较高的精确度。比例下降模型在理论上没有严格的证明，但有一些证据证明这个结论是合理的。例如，从 1967 年至 1986 年的 10 年间，美国旧金山的 CO 排放量降低了 30%，同期空气中的 CO 浓度也大约下降了 30%。

第三章的表 3—10 已经给出北京市 2000 年大气中 CO、NO_x 和 PM₁₀ 浓度的年日均值和机动车排放对浓度的分担率，根据目标年（2008 年和 2020 年）不同控制方案下机动车排放量相比基准年（2000 年）的削减比例，就能估算得到目标年相比基准年，由机动车排放引起的污染物浓度的下降，即空气质量的改善情况。由于不在本项目的研究范围之内，这里暂不考虑大气污染物本底浓度值下降以及其它源排放的削减对空气质量改善的影响。

假定目标年和基准年的全年平均气象条件不变，则机动车排放某种污染物的量和引起该污染物在大气中的平均浓度增加之间保持一定关系，即

$$C_i = f_i X_i \quad (6-1)$$

其中 C_i 为机动车排放引起污染物 i 的大气浓度向量， f_i 为污染物 i 的比例因子， X_i 为污染物 i 的排放向量。

在第三章中，根据 2000 年的数据已经计算得到 CO 的比例因子 $f_{CO} = 0.022 \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot 10^4 \text{t})$ ， X 向量的元素依次取为 2008 年基准方案、方案一、方案二、2020 年基准方案、2020 年替代燃料车方案下机动车的 CO 排放量，由式(4-1)计算得到

$$\begin{aligned} C_{CO} &= 0.022 [74.4, 74.0, 73.7, 26.8, 22.0] \\ &= [1.64, 1.63, 1.62, 0.59, 0.48] \text{mg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

对于 NO_x， $f_{NO_x} = 0.010 \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot 10^4 \text{t})$ ，则

$$\begin{aligned} C_{NO_x} &= 0.010 [5.70, 5.45, 5.37, 1.52, 1.32] \\ &= [0.057, 0.055, 0.054, 0.015, 0.013] \text{mg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

对于 PM₁₀， $f_{PM} = 0.079 \text{mg}/(\text{m}^3 \cdot 10^4 \text{t})$ ，则

$$\begin{aligned} C_{PM} &= 0.079 [0.205, 0.186, 0.176, 0.125, 0.105] \\ &= [0.016, 0.015, 0.014, 0.010, 0.008] \text{mg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

根据上面的计算结果，得到各方案下因机动车排放控制带来的大气环境中 CO、NO_x 和 PM₁₀ 平均浓度的降低，如表 6—4 所示：

表 6—4 北京市机动车排放控制带来的大气污染物平均浓度下降

单位： mg/m ³	2008 年			2020 年	
	基准方案	方案一	方案二	基准方案	替代燃料车方案
CO	0.43	0.44	0.45	1.48	1.59
NO _x	0.031	0.033	0.034	0.073	0.075
PM10*	0.001	0.002	0.003	0.007	0.009

*：仅考虑尾气管排放削减带来的影响

相比 2000 年北京市大气中 CO、NO_x 和 PM10 的年日均浓度：2.70mg/m³、0.129mg/m³ 和 0.162mg/m³（注：NO_x 的浓度不是监测数据的统计值，而是根据北京市 2000 年环境状况公报的 NO₂ 监测数据统计值换算得到的，比例为 1999 年 NO_x 和 NO₂ 监测数据的比值），由于目前机动车排放对 CO 和 NO_x 的浓度分担率很高，分别为 76.5%和 68.2%，所以加强机动车排放控制可以明显降低这两种污染物的环境浓度。

机动车直接或间接导致的 PM10 排放主要包括尾气管排放、刹车和轮胎磨损、道路扬尘和二次粒子，由于控制技术的关系，前面讨论的机动车排放控制都仅限于 PM10 的尾气管排放，其在机动车导致的 PM10 总排放中所占比例低于 30%。目前机动车尾气排放的 PM10 对其环境浓度的贡献率仅为 10.27%，因此虽然加强机动车排放控制对尾气管 PM10 排放削减的作用显著，最高达到 51%，但降低大气中 PM10 平均浓度的效果不如 CO 和 NO_x 明显。然而，尾气管排放的颗粒物中很大比例为细微颗粒物（PM2.5），对人体健康的影响程度大于 PM10，而且机动车排放大部分发生在人口密集地区，特别是对交通干道附近的空气质量有明显影响（这一点将在 4.2 节中详细讨论），如果从人体暴露量的角度考虑，其影响程度将有所增加，因此，尾气管排放 PM 一直是人们关注的焦点，在植树造林、防风治沙以降低北京市大气颗粒物本底浓度和减少固定源排放及扬尘的同时，加严机动车尾气排放颗粒物的控制也是非常必要的。

图 6-3 给出各种机动车排放控制方案对北京市大气中 CO、NO_x 和 PM₁₀ 平均浓度的削减潜力。

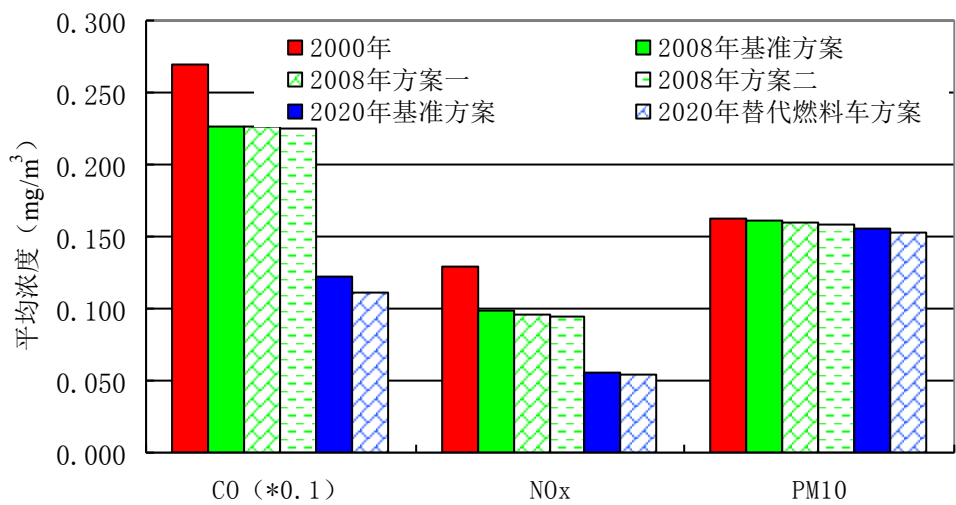


图 6-3 各控制方案对污染物平均浓度的削减潜力

可以看到，在 2008 年替代燃料车方案一下，CO 和 NO_x 平均浓度的削减潜力分别达到 16.4%和 26.0%，方案二下则分别为 16.6%和 26.6%；而 PM₁₀ 的平均浓度在方案一和方案二下，削减潜力分别为 1.4%和 1.9%。在 2020 年替代燃料车方案下，CO 和 NO_x 平均浓度的削减潜力分别达到 58.8%和 58.0%，而 PM₁₀ 为 5.4%。

6.3 2008 年重点街区空气质量改善分析

机动车排放对于局部的空气质量，特别是道路周边这种微尺度环境的影响较大。图 6-4 给出了北京 2000 年各自动监测站 PM₁₀ 年均浓度的统计结果。其中车公庄和前门监测站位于交通干线附近，是 PM₁₀ 污染最严重的几个监测站之一：年均浓度不仅超过了国家的二级空气质量标准（100μg/m³），而且也高于奥体、农展馆等代表城市平均污染水平的监测站（高出 10%~30%）。

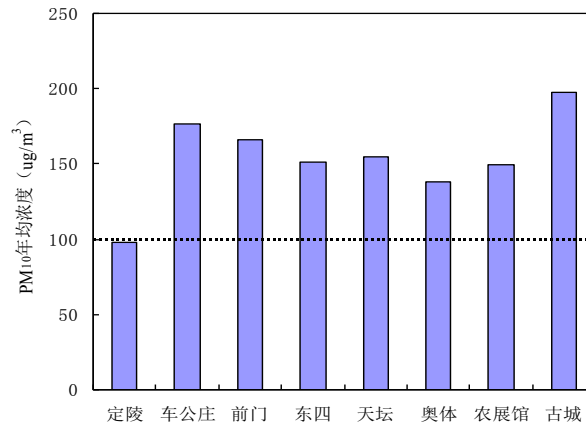


图 6—4 北京市 2000 年各自动监测站的 PM10 年均浓度

2008 年奥运会期间，位于奥运村和市中心的重点街区，其空气质量将受到更多的关注。本研究将利用 CALINE4 模型模拟发展替代燃料车对重点街区 2008 年空气质量改善的最大潜力。

6.3.1 CALINE4 模型的基本原理和计算方法

CALINE4 模型是美国加州交通局用来评估与公路车辆相关的污染物浓度的高斯扩散模式，可应用于公路或街区的交通源污染评估，作为大气污染评价、管理与决策的依据。

图 6—5 为 CALINE4 模型界面。

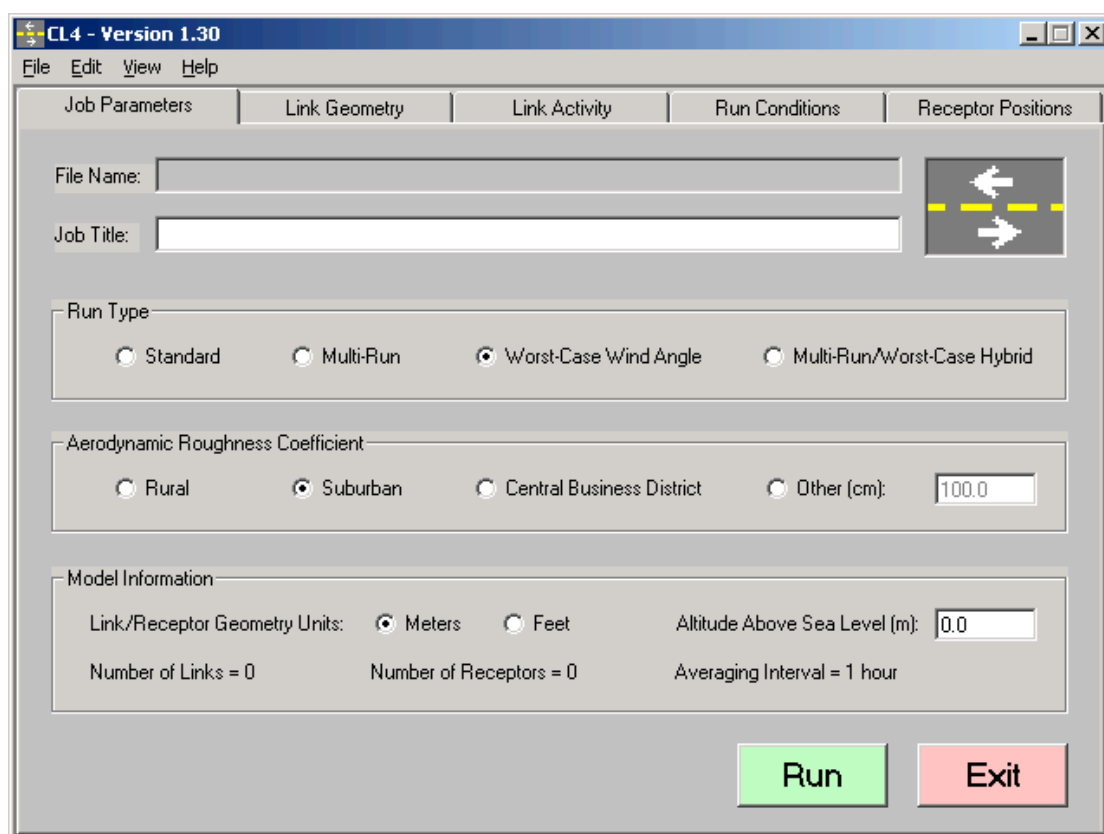


图 6—5 CALINE4 模型界面

CALINE4 模式对于线源的处理采取等量有限线源（Equivalent Finite Line Source）的分段方式，将道路划分为一系列线源，分别计算各线源排放的污染物在受体点产生的浓度，然后进行加和。距离受体点最近的第一个线源，其长度与道路宽度相等，位置和道路与风向夹角 θ 有关。其余线源的长度和位置由下式确定：

$$L_c = W \cdot L_f^n \quad (6-2)$$

其中 L_c 为线源长度； W 为道路宽度； n 为线源编号； L_f 为线源长度增长因子，与道路和风向的夹角 θ 有关。线源离受体点越远，其对受体点的影响就越小，线源的长度就越长，其数值可通过下式计算：

$$L_f = 1.1 + \theta^3 / (2.5 \times 10^5) \quad (6-3)$$

划分后每一个线源可看作一个中点在线源中心，方向与风向垂直的等效有限线源来模拟。对于无限小有限线源在受体点产生的浓度 dC ，根据高斯公式计算：

$$dC = \frac{Qdy}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} [\exp(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2})] \{ \exp[\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}] + \exp[\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2}] \} \quad (6-4)$$

其中 Q 为线源污染物排放源强(mg/m·s)；u 为风速(m/s)； σ_y 和 σ_z 为横向和垂向扩散参数(m)；h 为线源排放高度(m)。对整个有限线源积分可得到该有限线源在受体点上的污染物浓度 C：

$$C = \frac{Qdy}{\sqrt{2\pi} u \sigma_z} \{ \exp[\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}] + \exp[\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2}] \} \cdot PD \quad (6-5)$$

PD 为一正态分布函数，由下式计算：

$$PD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_2/\sigma_y}^{y_1/\sigma_y} \exp\left(\frac{-p^2}{2}\right) \cdot dp, \text{ 其中 } p = y/\sigma_y \quad (6-6)$$

CALINE4 模式将有限线源长度按 σ_y 进行分段，每段源强乘以一权重因子，并只计算在受体点 $\pm 3\sigma_y$ 范围内的六个线段对受体点的影响，超出该范围的线源由于其对受体点的影响很小而忽略。因此，整条道路排放污染物对受体点的总浓度为：

$$C = \frac{1}{\sqrt{2\pi} u} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{\sigma_{zi}} \left[\exp\left(\frac{-(z-h+2kL)^2}{2\sigma_{zi}^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h+2kL)^2}{2\sigma_{zi}^2}\right) \right] \cdot \sum_{j=1}^6 (WT_j \cdot Q_j \cdot PD_{ij}) \right\} \quad (6-7)$$

其中 N 为线源总数； WT_j 为源强权重因子；L 为混合层高度；k 为污染物在地面和混合层顶之间反射的次数。

CALINE4 模型在模拟车流运动对机动车污染物排放扩散的影响时引入了初始混合区（如图 6—6 所示）的概念。初始混合区的宽度定义为道路宽度然后在两边分别加 3m。

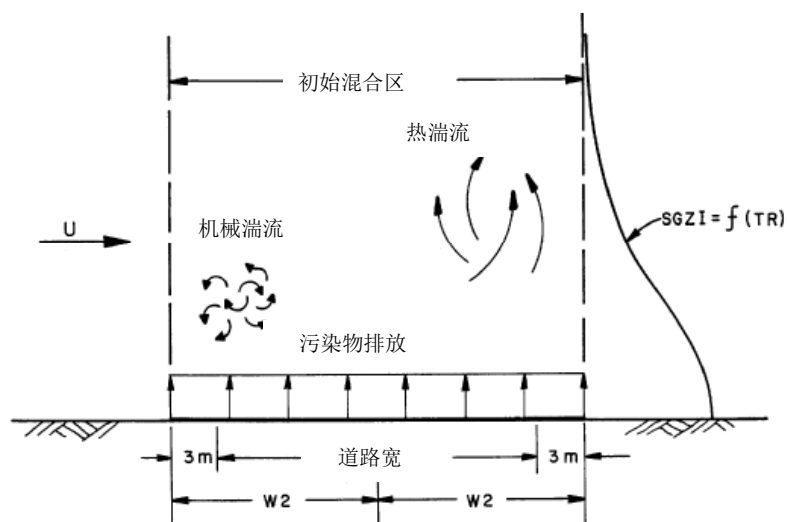


图 6—6 初始混合区

近年来国际上对机动车污染物扩散参数的研究成果表明，机动车在刚排放污染物时，会由于机械扰动和热紊流作用形成一定尺度的初始扩散。初始混合区反映了这种机动车尾流（机械湍流和热湍流）对排放产生的初始扩散作用的影响。模式认为初始混合区边缘存在一初始垂向扩散参数 σ_{z0} ，其值与污染物在初始混合区内的停留时间 T 成正比：

$$\sigma_{z0} = 1.5 + T/10 \quad (6-8)$$

其中， T 由式（6-9）计算：

$$T = \begin{cases} W^2/(u \cdot \sin \theta), & \theta \geq 45^\circ \\ W^2/(u \cdot \sin 45^\circ), & \theta < 45^\circ \end{cases} \quad (6-9)$$

式中， W 为初始混合区半宽； θ 为道路和风向的夹角。

6.3.2 CALINE4 模型的应用

CALINE4 模型的应用范围是惰性气态污染物的扩散模拟，从城市大气中主要的污染物种类看，只有 CO 符合要求。然而，如果模拟中受体点离排放源的距离很近，二次污染物如 NO_2 和 PM_{10} 等还来不及生成，颗粒物的干/湿沉降量也很小，这时可将 NO_x 和 PM_{10} 仅考虑为一次污染物进行模拟。

CALINE4 曾被用于北三环西路的 PM_{10} 浓度模拟，结果表明，它用于模拟

类似的开阔道路的颗粒物质量浓度是适用的。由于篇幅关系，这里不再细述。

6.3.3 重点街区空气质量改善模拟

2008 年奥运会举办期间，位于奥林匹克体育中心西侧，连接北三环和北四环的北辰路段将成为交通要道之一（地理位置如图 6—7 所示），其周边的空气质量状况值得关注。

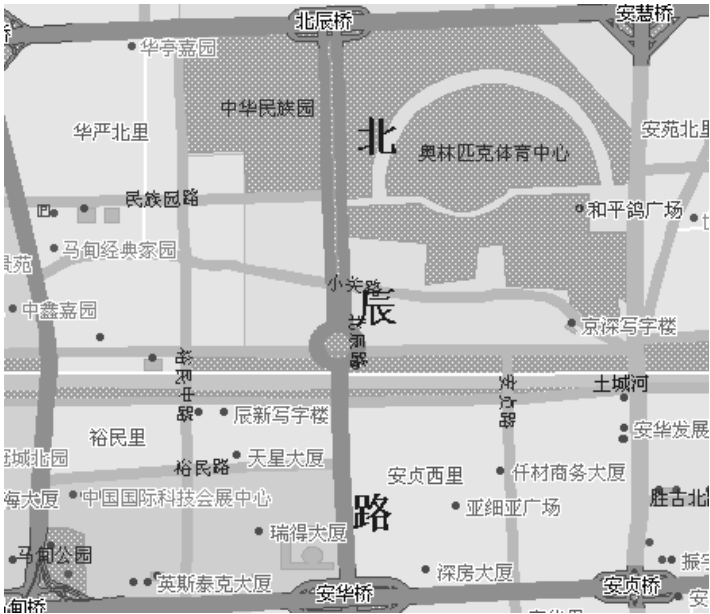


图 6—7 北辰路地理位置

由地图上的量测，从安华桥到北辰桥的北辰路段为正南—正北位置，长约 2100m，宽约 40m；北三环和北四环路的宽度均约为 60m，考虑和北辰路距离很远的路段，其行驶车辆的排放对北辰路周边的空气质量影响较小，在长度上只取安华桥和北辰桥东西各 2100m；另外，离北辰路比较近的主干路还有八达岭高速公路、安定路和鼓楼外大街，它们的长度和宽度和北辰路基本相同（八达岭高速稍有弯曲，但由于其对北辰路的空气质量影响不会很大，故近似作线段处理即可）。其它如北土城路、小关路等车流量较小的路段，估计其影响很小，不再考虑。

根据 2001 年的观测，北三环路的高峰小时车流量超过 10000 辆，逐时平均流量为 7000 多辆，北四环的车流量不低于北三环。北辰路和安定路等车流量要低一些，下表中列出了这些路段白天和夜间平均车流量的设定值。

表 6—5 各主干道平均车流量

单位：辆/小时	白天	夜间
北三环路	9000	3000
北四环路	9000	3000
北辰路	7500	2500
八达岭高速公路	7500	2500
安定路	6000	2000
鼓楼外大街	6000	2000

由于这些主干道上行驶车辆的构成与全市的机动车保有量构成不同，比如公交车比例较高，由北三环上观测得到的车型构成比例计算平均排放因子，各条道路之间的差异不再考虑，结果如下表所示：

表 6—6 主干道行驶车辆的平均排放因子

	CO	NOx	PM10
单位：g/km	29.33	3.27	0.089

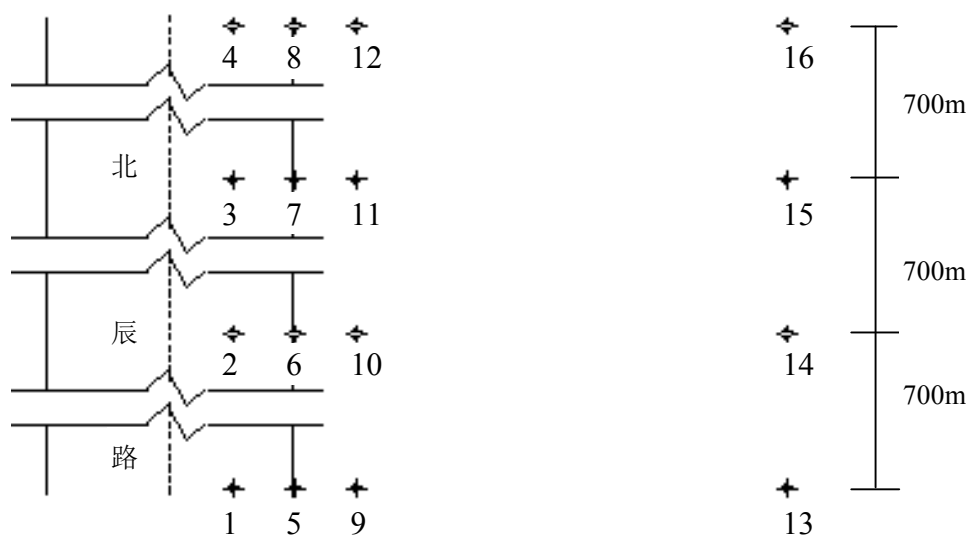
根据 2001 年 9 月份在北三环路监测得到的气象数据，统计得到白天和夜间的平均气象条件如下：

表 6—7 九月份平均气象条件

	风向（度）	风速（m/s）	气温（摄氏度）	稳定度等级
白天	138	2.4	26.2	3
夜间	157	1.7	23.1	4

注：风向为 0 度对应北风，180 度对应南风

选择的受体点为沿北辰路南北方向上平均间距的 4 个位置，垂直于北辰路距其中轴线分别为 10m、20m、30m 和 100m 共 16 个点，大致反映了道路中央和机动车道边沿、人行道边沿和路边生活区的情况。



各受体点位置如图 6-8 所示:

图 6-8 受体点的位置

白天和夜间的模拟结果如表 6-8 和表 6-9 所示:

表 6-8 机动车排放在受体点引起的平均小时浓度 (白天)

受体点	CO (mg/m^3)	NO _x (ug/m^3)	PM ₁₀ (ug/m^3)
1	6.4	712.2	19.4
2	3.3	372.0	10.2
3	3.2	356.0	9.7
4	7.0	780.4	21.3
5	5.4	605.4	16.5
6	2.2	242.2	6.6
7	2.0	226.3	6.1
8	5.9	663.4	18.1
9	4.7	525.1	14.3
10	1.3	142.3	3.9
11	1.1	126.4	3.5
12	5.1	563.5	15.4
13	4.1	452.0	12.3
14	0.5	52.9	1.5
15	0.3	37.2	1.1

16	4.3	474.2	12.9
----	-----	-------	------

表 6—9 机动车排放在受体点引起的平均小时浓度（夜间）

受体点	CO (mg/m ³)	NOx (ug/m ³)	PM10 (ug/m ³)
1	8.5	947.7	25.9
2	5.4	605.8	16.5
3	5.3	587.8	16.0
4	9.7	***	29.6
5	7.4	828.6	22.6
6	4.1	457.6	12.5
7	3.9	439.7	12.0
8	8.4	937.0	25.5
9	6.5	719.3	19.6
10	2.9	322.0	8.8
11	2.7	304.1	8.3
12	7.2	801.4	21.8
13	5.0	558.4	15.3
14	1.1	125.0	3.4
15	1.0	107.1	3.0
16	5.4	604.5	16.5

***：超过模拟浓度的上限值 1000ug/m³，数据无法正常显示

由上面的结果可以看到，机动车排放引起的交通环境污染物浓度相当可观。将结果和北京市大气污染物浓度的年日均值比较，发现前者在某些受体点引起的 CO 和 NOx 的浓度都大大超过了年日均值，而 PM10 浓度虽然没有超过年日均值，亦明显大于前面提到的机动车排放引起的 PM10 平均浓度（17ug/m³），反映了交通环境的污染特征。

参照国家环境空气质量标准，可以看到 CO 的小时浓度值尚未超出二级标准（10mg/m³）。由于现行的标准使用 NO₂，这里参考由澳门的一个路边监测点数据统计得到的 NO₂/NOx 比值 0.37，估算机动车排放引起的受体点 NO₂ 浓度。结果表明污染最严重的点 1、4、5、8（均位于北辰路和三/四环路上），白天和夜间的 NO₂ 小时浓度平均值分别为 0.26mg/m³ 和 0.33mg/m³，仍然超过小时浓度的

二级标准（ $0.24\text{mg}/\text{m}^3$ ），更大大超过日均浓度标准值（ $0.12\text{mg}/\text{m}^3$ ）。

比较典型的点 1、4、5、8 和点 10、11（位于人行道边沿）和点 14、15（位于路边生活区），可以得到机动车排放在白天引起的平均小时浓度比值约为 15:3:1，在夜间的比值约为 8:2.7:1，说明机动车排放对近地交通环境的影响明显大于较远地点，引起的污染物浓度随距离增加衰减速度很快。

在现在的基础上，根据前面预测的 2008 年各种方案下北京市机动车排放的削减情况，就可以估算不考虑污染物本底浓度值下降以及其它源排放的削减时，2008 年北辰路周边空气质量的改善潜力。

图 6—9 就点 1、4、5、8 的平均浓度下降给出各方案对交通环境空气质量的改善潜力。

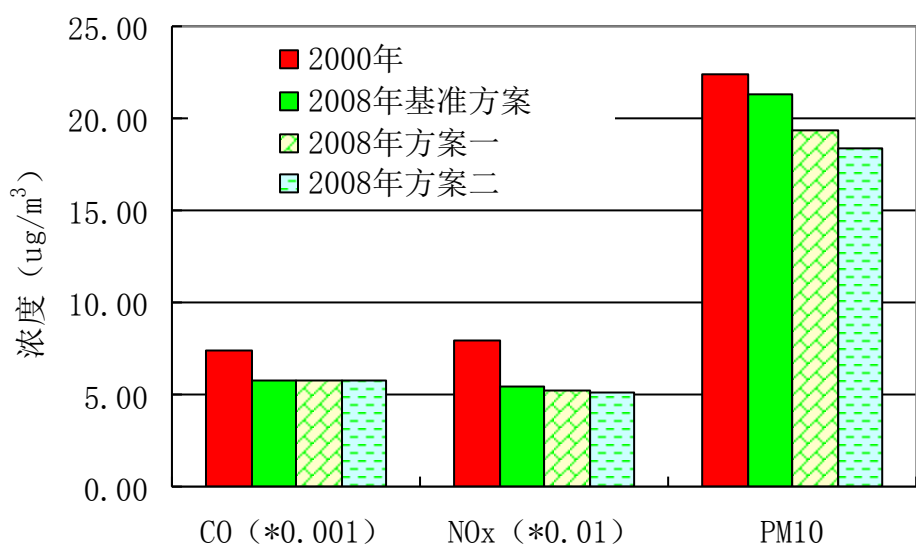


图 6—9 机动车排放控制对交通环境空气质量的改善潜力

在假定 2008 年奥运会举行期间北京市气象条件不变的情况下，基准方案可使上述点的 CO、NO_x 和 PM₁₀ 平均浓度分别下降 1.56、0.256 和 $0.001\text{mg}/\text{m}^3$ ，而方案一可使 CO、NO_x 和 PM 平均浓度分别下降 1.59、0.280 和 $0.003\text{mg}/\text{m}^3$ ，方案二可使 CO、NO_x 和 PM 平均浓度分别下降 1.61、0.288 和 $0.004\text{mg}/\text{m}^3$ 。和表 6—3 比较，可以看到机动车排放控制对路边 CO 和 NO_x 浓度的绝对削减量要大得多，对 PM₁₀ 浓度的绝对削减量也要稍高，但影响路边 PM₁₀ 浓度的因素，要比 CO 和 NO_x 浓度复杂得多。

参考文献

- [1] 郝吉明、傅立新、贺克斌、吴烨. 城市机动车排放污染控制. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.1
- [2] 吴烨、郝吉明、李伟、傅立新. 应用 PART5 模式计算机动车尾气管的颗粒物排放. 环境科学, 2002, 23(1): 6~10
- [3] 吴烨. 城市交通环境颗粒物污染特征研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2002
- [4] Division of new technology and research, Caltrans. CALINE4—A dispersion model for predicting air pollution concentration near roadways. State of California, Department of Transportation. FHWA/CA/TL-84-15, June 1989
- [5] 环境空气质量标准, GB3095-1996
- [6] 国家环境保护总局. 环境空气质量标准 (GB3095-1996) 修改单. 环发[2000]1号

第七章 结论和建议

7.1 结论

- (1) 随着北京市大气污染由煤烟型向煤烟和机动车复合型污染的转变, NO_x 和 PM 排放和污染成为人们日益关注的问题。在今后一段时期内, 北京市机动车保有量将保持持续增长的趋势, 预计 2008 年奥运会期间总保有量将可能达到 325 万辆以上, 1000 人平均保有 275 辆; 2020 年全市机动车保有量将接近 500 万辆, 1000 人平均接近 400 辆。其中轿车增长最为迅速。对机动车污染的控制(尤其是 PM 和 NO_x+NMHC 的排放)是今后北京市大气污染控制的重点。替代燃料车技术有助于减少机动车尾气中主要污染物的排放, 同时可一定程度缓解常规能源需求紧张的压力, 成为今后控制机动车污染排放的重要措施。
- (2) 在目前比较可行的应用中, 混合动力轿车的费用效果最好, 其次是 CNG 和 LPG 轻型车(包括专用车和双燃料车), 醇类车在排放削减的效果上不明显, 甲醇车还存在有毒物质排放的问题。由于轻型汽油车相比于其他车型, 发动机和排放控制技术、油品质量等均提高较快, 其污染物排放会大幅降低, 未来应用替代燃料车对污染物排放的削减效果不会非常显著。特别是国内目前最关心的 PM 排放, 由于汽油车本身 PM 排放低, 预测 2008 年北京市轻型汽油车 PM 平均排放因子只有 $0.015\sim 0.044\text{ g/km}$, 已没有多少的削减空间。但另一方面, 由于轻型车保有量在各类车中最大, 在该领域发展替代燃料车, 对于调整能源结构和一定程度上降低污染物排放仍具有十分重要的意义, 首选车型为技术趋近成熟、燃料供应充足且价格适中的混合动力轿车。
- (3) 如果暂不考虑 THC 排放增加带来的负面影响, CNG 车和混合动力车是公交车领域首选的替代燃料车型; CNG 车带来的 THC 排放增加主要是甲烷, 对局地空气质量的影响很小。甲醇车对 PM_{10} 和 NO_x 排放的削减效果也较好, 但燃料使用的可靠性还难以保证, 而且可能造成较多有毒的甲醇和甲醛排放, 不宜过早地引入北京市, 建议先在国内其它地区进行试

点或进一步发展。纯电动车和燃料电池车在各种污染物排放上都有显著削减，但高成本导致费用效果比较差，目前只能做小规模示范运行，特别是燃料电池车，只有等待技术进步后成本大幅下降，它们才有可能大规模发展。乙醇和生物柴油车在污染物排放削减上的费用效果不好，从改善空气质量的出发点出发不宜考虑；但如果出于能源结构调整的角度，建议可在国内其它地区进行试点。

- (4) 就北京市目前的大气污染控制而言，从削减卡车 PM 排放的角度考虑，选择低硫柴油和 CNG 卡车比较好；如果再考虑 NO_x+NMHC 和 CO 排放的削减，选择 CNG 更有保证。LNG 卡车的费用效果目前尚不如 CNG 车，但其技术正在进一步发展，逐步商业化的进程较快，作为同一种替代燃料的不同应用形式，目前可以考虑两种车型按一定比例发展。但是，也需要注意目前使用天然气燃料会造成甲烷排放明显增加。
- (5) 尽管北京市机动车保有量预计从 2000 年的 151 万辆迅速增长到 2020 年的近 500 万辆，但在机动车排放控制水平不断提高、控制措施不断加严的条件下，污染物排放总量仍有较显著的下降。为进一步控制机动车排放，改善北京市大气环境质量，本研究提出的 2008 年替代燃料车发展方案一和方案二规划，都对替代燃料车采取了大力的推广措施。方案一下公交车有 4500 辆单一 CNG 车，800 辆无轨电车，100 辆混合动力车，以及少数示范运营的纯电动车和燃料电池车，共占到公交车总量的 30.1%；市政车辆（环卫车）中有 3000 辆单一 CNG 车，占总数的 37.5%；出租车中有 2 万辆单一 LPG 车和 1000 辆混合动力车，占到总数的 30%；另外政府用车中有 2000 辆混合动力车。2008 年方案一相比基准方案对北京市机动车常规污染物排放的削减效果，按削减比例由高至低依次为 PM₁₀、NO_x、CO 和 HC，PM₁₀ 的削减比例达到 9.1%，NO_x 排放削减比例达到 4.4%，结果表明方案一的减排效果基本令人满意。方案一下，发展天然气汽车的总投资将达到 86.5 亿元，相比基准方案增加投资 31.8 亿元，年耗天然气约 1.5 亿 m³；发展电动汽车的总投资将达到 8.8 亿元，相比基准方案增加投资 0.9 亿元。

- (6) 在方案一的基础上，方案二考虑在重型车中进一步推广单一 CNG 车，单一 CNG 公交车的数量达到 7000 辆，占到公交车总量的 38.9%；同时在轿车（出租车和政府用车）中进一步推广混合动力轿车，数量达到 6000 辆。方案二相比基准方案对于北京市 2008 年机动车常规污染物排放的削减效果，由高至低仍然依次为 PM₁₀、NO_x、CO 和 HC，PM₁₀ 的削减比例达到 13.9%，NO_x 排放削减比例达到 5.9%。方案二下，发展天然气汽车的总投资将达到 121.8 亿元，相比基准方案的增加投资将达到 43.3 亿元，年耗天然气约 2.0 亿 m³；发展电动汽车的总投资将达到 14.8 亿元，相比基准方案增加投资 1.4 亿元。
- (7) 对于 2020 年的长期发展规划，主要出发点是能源结构调整和节约能源，兼顾机动车排放的削减，替代燃料车发展方案中 CNG 车、混合动力车和乙醇汽油占主要地位。尽管北京市 2020 年基准方案下机动车排放已经达到较高的控制水平，但由于替代燃料车发展方案中较大规模引入天然气和混合动力车等排放更低的车型，替代燃料车发展方案在 HC、CO、NO_x 和 PM₁₀ 排放上有约 13%~18% 的进一步削减，PM₁₀ 的削减比例达到 16.1%。
- (8) 替代燃料车发展方案对机动车排放有明显的削减，将给空气质量带来一定程度的改善。2008 年方案一和方案二能使市区 CO 平均浓度比 2000 年下降 0.45mg/m³ 和 0.45mg/m³，NO_x 平均浓度下降 0.033mg/m³ 和 0.034mg/m³，PM₁₀ 平均浓度下降 0.002mg/m³ 和 0.003mg/m³。2020 年替代燃料车发展方案将使 CO 平均浓度比 2000 年下降 1.59mg/m³，NO_x 平均浓度下降 0.075mg/m³，PM 平均浓度下降 0.009mg/m³。由于尾气管排放 PM 占机动车导致的 PM 总排放比例不高，实施替代燃料车发展计划对降低全市大气颗粒物浓度不会特别明显。但是，尾气排放 PM 的削减，会大量减少对人体危害较大的细微颗粒物（PM_{2.5}）产生，对道路周边的局地空气质量将有较大程度的改善。2008 年替代燃料车方案一下，奥运会期间重点道路（北辰路）因机动车尾气排放导致的路边大气中 CO、NO_x 和 PM 浓度相比 2000 年最多分别下降 1.59、0.280 和 0.003mg/m³，方案二下最多分别下降 1.61、0.288 和 0.004mg/m³。

7.2 建议

- (1) 就目前的情况而言，大多数地区引入替代燃料是首先从减少机动车排放的角度考虑，即希望使用“更清洁”的汽车。但是，“清洁燃料车”这个概念却缺乏明确的定义，为保证排放削减的效果，有必要制定一套相应的标准。鉴于北京市正在准备引入欧洲 3 号机动车排放标准，如果同时引入欧洲的“加严型环境友好车辆”（EEVs）标准，作为国内“清洁燃料车”的自愿性标准。由于属于同一套标准体系，在测试方法上完全相同，则操作起来将比较容易实行。
- (2) 依据现有替代燃料车排放水平和发展趋势，建议北京市近期首先加快天然气能源供应的基础设施建设，加强对重型柴油车等高污染排放车的燃气化力度，保证对 PM 和 NO_x 的削减效果；对于轻型车，建议大力发展混合动力轿车。混合动力重型车和燃料电池车可作为试点工程逐步引入，作为长期的发展目标。
- (3) 北京市在用的专用天然气公交车全部采用 Cummins 公司的发动机，车用天然气的成分指标大部分能满足 Cummins 公司推荐的标准，但总硫份的含量可能偏高，这会对尾气净化设备造成影响，而导致车辆排放增加。建议对车用天然气中的硫份含量做进一步的限制，如果不能一步达到 Cummins 公司推荐的 0.001% 的限值，可以先采用美国加州标准的 0.003% 限值。
- (4) 燃料的零售价对驾驶者使用某种燃料的积极性影响非常大，很多时候，驾驶人员会根据单位行驶里程的燃料费用来决定是否选用该种燃料。就北京市目前的 CNG 和 LPG 价格而言，还有下降的余地，现在的价格不足以和传统汽、柴油竞争。乙醇的价格现在太高，需要下降 50% 左右，才有和汽、柴油竞争市场的潜力。
- (5) 从当前国际上机动车的发展趋势来看，混合动力汽车是一个重要的发展方向。国内要发展自己的混合动力技术，对重型车比较可行的办法是从简单的车辆改造逐步做起，对轻型车则是想办法引进国外技术，将其本

土化。而车用蓄电池技术的发展，也可以考虑应用到混合动力车上。