



能 源 基 金 会
项目资助号：G-1111-15209

中国机动车非 CO₂ 温室气体排放及其削减 潜力研究

An Investigation of Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions
from the Motor Vehicles in China and Its Control
Potential Analysis

中国环境科学研究院

二〇一三年九月

摘要

近年来中国汽车工业保持高速发展，截至 2013 年 1 月，中国机动车保有量达 2.4 亿辆，其中汽车达 1.2 亿辆，产销量连续四年居世界首位。机动车排放已成为中国城市和区域大气污染的主要来源之一，也是温室气体排放中增长最快的领域之一。在中国的一些城市，机动车已成为 CO₂ 的第二大人为排放源。而对于非 CO₂ 类温室气体，机动车排放同样不容忽视。

中国大部分机动车温室气体排放研究都集中于 CO₂，对 CH₄、N₂O 和 HFCs 等非 CO₂ 类温室气体的研究很少，对三者的单车排放水平和总排放量更缺乏足够认识。由于没有可靠的数据和技术支持，使得政府很难开展机动车非 CO₂ 类温室气体的排放控制。本研究选取国内约 60 辆轻型汽油车、摩托车和重型柴油车进行了实验室台架和实际道路排放测试，结合 10 余座典型城市的实地调查和大量的文献调研，获得了中国机动车活动水平及排放特征，在此基础上建立了全国层面的机动车 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 排放清单，并进一步分析了减排潜力，以期为决策者开展机动车非 CO₂ 温室气体排放控制提供参考依据。

研究得出了以下主要结论和建议：

(1) 实验研究获得的轻型汽油车 CH₄ 排放因子在 0.017~0.064 g/km 之间，而天然气-汽油双燃料车的 CH₄ 排放因子平均值高达 1.17 g/km，摩托车 CH₄ 排放因子在 0.029~0.054 g/km 之间。轻型汽油车的 N₂O 排放因子在 0.008~0.076 g/km 之间，柴油货车的 N₂O 排放水平非常低，其最大值约为 0.014 g/km，摩托车的 N₂O 排放因子则在 0.014~0.025 g/km 之间。

(2) 2010 年中国机动车 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 等非 CO₂ 类温室气体的排放总量分别为 25.13×10^4 t (527.80×10^4 t CO₂ 当量)、 6.02×10^4 t (1866.23×10^4 t CO₂ 当量) 和 1.18×10^4 t (1530.92×10^4 t CO₂ 当量)，共计 3924.95×10^4 t CO₂ 当量，约为机动车温室效应污染物（包括 CO₂、CH₄、N₂O、HFC-134a 和 BC）排放的 5%。在 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 中，轻型客车（汽油车和双燃料车）是排放的主要来源，均占 50% 以上。

(3) 基线情景下，2020 年 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 三类机动车非 CO₂ 类温室气体排放量分别为 39.31×10^4 t (825.43×10^4 t CO₂ 当量)、 7.47×10^4 t (2314.60×10^4 t CO₂ 当量) 和 3.23×10^4 t (4915.41×10^4 t CO₂ 当量)，共计 7335.45×10^4 t CO₂ 当量。

在 2020 年基线情景的基础上，综合考虑执行加严的排放标准、替代燃料（天然气）、制冷剂回收和制冷剂替换四个减排情景，制冷剂替换可减排 26.24%，效果最为显著；其次是排放标准的加严，减排比例为 21.71%；制冷剂回收可减排 5.70%。与这三种减排情景不同的是，选用天然气作为替代燃料会导致非 CO₂ 温室气体排放增加 3.16%，但是 CO₂ 会有较大幅度降低，足以抵消因 CH₄ 排放量增加带来的温室效应。

目 录

第 1 章 机动车排放的非 CO₂ 类温室气体概况	1
1.1 机动车温室气体排放	2
1.2 非 CO ₂ 类温室气体的研究案例	4
第 2 章 测试方法及数据分析	11
2.1 车辆信息	11
2.2 测试及采样平台	15
2.2.1 轻型车测试平台	15
2.2.2 重型车测试平台	18
2.2.3 摩托车测试平台	20
2.3 样品分析平台	22
2.3.1 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子计算方法	22
2.3.2 样品分析方法	22
2.3.3 CH ₄ 测量	23
2.3.4 N ₂ O 测量	25
2.4 非 CO ₂ 类温室气体排放因子	27
2.4.1 CH ₄ 排放因子	27
2.4.2 N ₂ O 排放因子	30
2.5 小结	32
第 3 章 中国机动车非 CO₂ 类温室气体排放清单	33
3.1 机动车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放清单	33
3.1.1 研究方法	33
3.1.2 参数确定	34
3.1.3 CH ₄ 和 N ₂ O 排放清单	39
3.1.4 排放清单估算的不确定性分析	40
3.2 机动车 HFC-134a 排放清单	41
3.2.1 机动车空调制冷剂 HFC-134a 实地调研	41

3.2.2 研究方法及参数确定.....	43
3.2.3 HFC-134a 排放清单.....	46
3.2.4 汽车空调制冷剂 HFC-134a 排放不确定性分析.....	47
3.3 非 CO ₂ 温室气体排放清单及与其他研究结果的分析.....	47
3.4 小结.....	49
第 4 章 机动车非 CO₂ 类温室气体减排潜力分析	51
4.1 基线情景下机动车非 CO ₂ 类温室气体排放预测	51
4.2 减排情景下机动车非 CO ₂ 类温室气体排放预测	54
4.3 小结.....	61
第 5 章 结论及建议	63
参考文献	65

第 1 章 机动车排放的非 CO₂ 类温室气体概况

空气的主要成分是氧气和氮气，但是因为两者并不吸收地面辐射，因此并不会产生温室效应，温室效应主要由水蒸气、CO₂ 及其他痕量气体吸收地面辐射而产生。根据联合国气候变化框架公约（UNFCCC），温室气体包括 CO₂ 和非 CO₂ 类温室气体即甲烷、氧化亚氮、含氟气体（氢氟碳化合物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（SF₆）和三氟化氮（NF₃）。在《京都议定书》规定了对二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O）等六种温室气体的减排目标，其中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三种温室气体排放占温室气体全球增温潜势（GWP）的 95% 以上，是主要的减排对象。但是，CO₂、CH₄ 和 N₂O 是自然界中本来就存在的成分，由于人类活动而增加，而含氟气体 HFCs、PFCs、SF₆ 和 NF₃ 则完全是人类活动的产物。

不同气体对温室效应的影响程度采用温室效应潜势来表示，非 CO₂ 温室气体的温室效应潜势及在大气中的寿命如表 1-1 所示^[1]：

表 1-1 非 CO₂ 温室气体的温室效应潜势及寿命

气体	大气中寿命（年）	温室效应潜势
CO ₂	50-200	1
CH ₄	12±3	21
N ₂ O	120	310
HFC-23	264	11,700
HFC-32	5.6	650
HFC-125	32.6	2,800
HFC-134a	14.6	1,300
HFC-143a	48.3	3,800
HFC-152a	1.5	140
HFC-227ea	36.5	2,900
HFC-236fa	209	6,300
HFC-4310mee	17.1	1,300

CF ₄	50,000	6,500
C ₂ F ₆	10,000	9,200
C ₄ F ₁₀	2,600	7,000
C ₆ F ₁₄	3,200	7,400
SF ₆	3,200	23,900

2007 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 公布的研究报告^[2], 指出从工业革命开始 (1750 年) 前到 2005 年, 大气中的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度因为人类活动分别升高了 36%、148%和 18%, 人类活动导致全球变暖的可能性在 90%以上。这一结论确定了气候变化问题的重要性和紧迫性, 各国都投入了更多的关注, 并考虑在 2012 年《京都议定书》失效后, 继续建立一个政府间的温室气体减排协议, 抑制全球变暖, 但至 2013 年底尚未达成一致的政府间温室气体减排协议。

1.1 机动车温室气体排放

美国在 2002 年退出了《京都议定书》, 但在温室气体排放研究和控制领域开展了大量工作。美国环保局 2011 年发布的国家温室气体排放清单报告^[1], 指出从 1990 年到 2009 年, CO₂、CH₄ 和 N₂O 一直是美国最主要的 3 种温室气体, 其排放的 GWP 占到温室气体总量的 99%以上。其中交通的温室气体排放量在各行业中名列第二, 仅次于电力行业。1999-2009 年间, 交通 CO₂ 排放量占到总量的 30% 左右; 交通 N₂O 排放量继农业之后排列第二, CH₄ 排放第十二。2009 年交通领域的 CH₄ 和 N₂O 分别占温室气体总排放的 0.03%和 0.5%, N₂O 和 CH₄ 的等效 CO₂ 排放量占总排放量不到 1%。交通 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等效排放量和总温室气体排放量见图 1-1。可以看出从 2000 年以后总温室气体的排放量在逐渐下降。

在欧洲环境署 2007 年发布的温室气体排放清单报告中^[3], 同样指出移动源的 CO₂ 排放量在各行业中列第二位, 仅次于发电和采暖部门, N₂O 排放量在各行业中列第五位。CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放量占总温室气体排放量的比例分别是 20%, 0.1%和 0.5%。从 1990 年 2005 年温室气体排放量增加了 26%, 见图 1-2

所示。

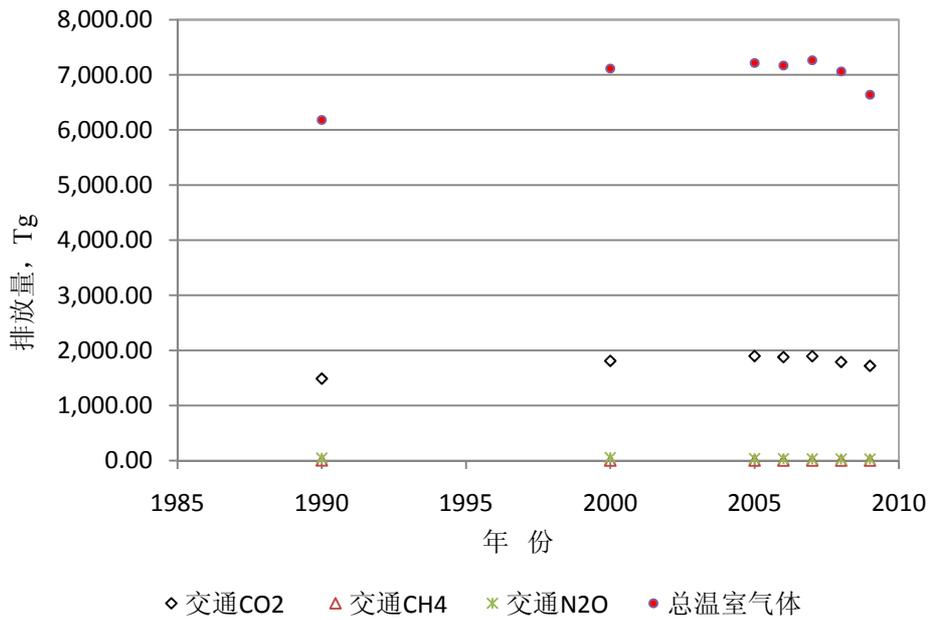


图 1-1 美国 1999-2009 年交通领域 CO₂、CH₄、N₂O 等效排放量变化趋势

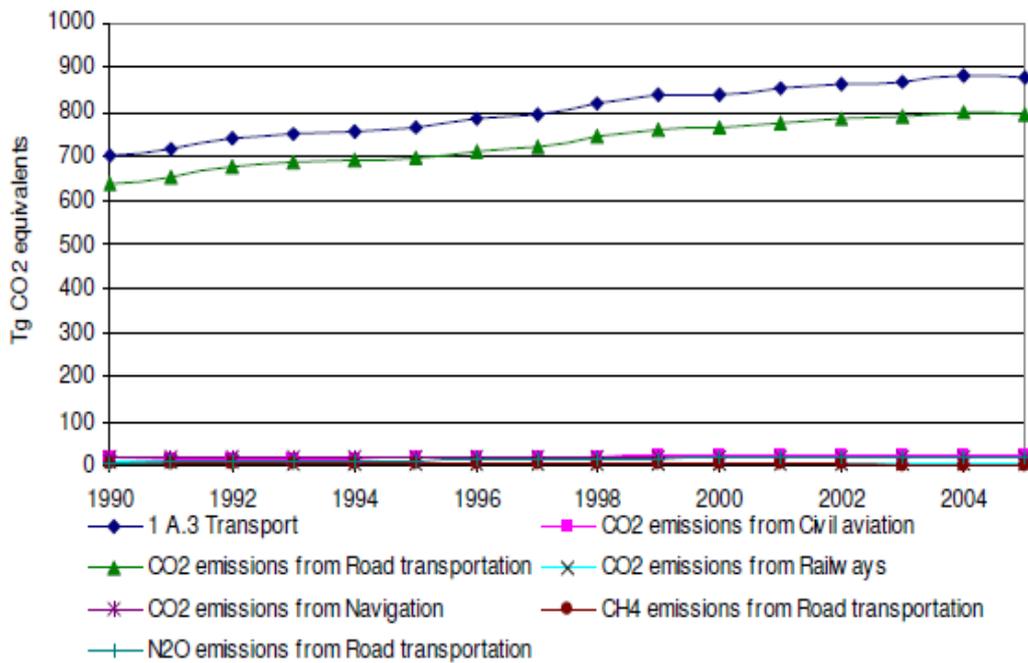


图 1-2 1990-2005 年欧盟交通领域温室气体排放变化趋势

中国的机动车保有量近些年快速增长,根据清华大学的研究,1997 年到 2002 年的 5 年间,中国道路机动车的 CO₂ 排放量就从 1.5 亿吨增加到 2.3 亿吨,增长了 50%; 预计到 2020 年以前,由于交通活动增加、能源结构调整和技术发展进

步等多种因素影响，机动车的温室气体排放还会继续有大幅变化。《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）要求所有缔约方提供温室气体各种排放源和吸收汇的国家清单，促进有关气候变化和应对气候变化的信息交流。因此为了积极应对气候变化，中国于 2004 和 2013 年分布公布了第一、二次《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》，目前仍在开展相关研究工作。

1.2 非 CO₂类温室气体的研究案例

国内外针对机动车的非 CO₂ 温室气体的排放研究，主要有以下的研究成果：

1 布宜诺斯艾利斯道路交通排放研究案例^[4]

阿根廷首都布宜诺斯艾利斯的道路交通排放研究是南美洲大城市化学天气预测项目的研究内容之一。在充分利用少量的实际测试数据情况下，通过收集阿根廷、巴西、智利、哥伦比亚的机动车排放测试数据，采用 COPERT IV 模型建立了符合拉美地区机动车保有量和行驶状况的区域机动车排放清单，并利用缩小尺度的国家排放数据和 EDGAR 全球排放数据库对排放清单进行了验证。研究表明，采用老旧技术的机动车污染物排放的贡献率高达总排放的 80%，非 CO₂ 温室气体 CH₄、N₂O 的排放因子与机动车的车型、车龄、燃料类型等因素有关，重型车 CH₄ 的排放量明显高于轻型车，车龄较长的机动车排放量约高于新车 1~4 倍，汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放量均高于柴油车。但对于轻型车而言，在采用压缩天然气（CNG）代替燃油后，CO₂ 排放量减少了 6%，但 CH₄ 和 N₂O 排放分别增加了 62% 和 49%，全球变暖潜势降低 3±2.8%。测试分析数据显示，CH₄ 和 N₂O 排放因子的大小则主要取决于燃料类型，与车型及车龄基本无关。CNG 车 CH₄ 的平均排放因子为 0.709g/km，分别高于汽油车和柴油车 3.8~18.7 倍和 20.8~88.6 倍；N₂O 排放因子为 0.068 g/km，是汽油车 1.5~5.2 倍，柴油车 13.6 倍以上。

2 澳大利亚重型车替代燃料排放研究案例^[5]

澳大利亚重型车替代燃料排放研究利用生命周期评价法（LCA）对使用替代燃料的温室气体（CO₂、CH₄ 和 N₂O）排放因子进行了量化。分析测试的替代燃料包括低硫柴油（LSD），超低硫柴油（ULS），压缩天然气（CNG），液化天然

气 (LNG), 液化石油气 (LPG), 乙醇 (来源于木质纤维素), 生物柴油 (BD) 和废油 (W)。通过替代燃料在预燃和燃烧阶段污染排放的研究来估算了重型车的温室气体排放因子。研究分析得出, 汽油和柴油车 CH_4 的排放主要取决于催化转换器的使用, 但对于天然气车而言, CH_4 的排放则来源于车辆行驶过程中泄漏和未燃尽的甲烷。 N_2O 是在机动车尾气在催化剂在作用下催化转化过程中产生的。在考虑生命周期的基础上, 生物柴油和乙醇温室气体的排放量 (以 g/km 计) 较低。相对于传统燃料, 生物柴油可以使温室气体排放量减少 41-51%, 而乙醇可降低 49-55% 的排放量。比较测试结果, 使用乙醇燃料的重型车 CH_4 和 N_2O 排放因子最低, 低于其他燃料车辆数倍甚至数十倍。使用天然气燃料 (CNG、LNG) 的车辆 CH_4 的排放量最高, 而生物柴油的 N_2O 排放因子最大。

3 加拿大重型车温室气体排放研究案例^[6]

加拿大环境部排放测量与研究所 (ERMD) 对机动车温室气体排放研究进行了总结。ERMD 所做的工作主要包括在底盘测功机上和实车道路上研究测试使用不同燃料, 柴油、生物柴油、压缩天然气 CNG、hythane (20% H_2 , 80% 天然气) 和液化天然气 LNG 以及不同的后处理技术的各类型的重型车的温室气体 (CO_2 、 CH_4 和 N_2O) 排放因子。研究表明, 使用不同的燃料, 对温室气体的排放有不同的效应。与柴油车相比, 天然气的使用 (无论是压缩、液化或是加氢混合) 可以降低尾气温室气体排放的 10-20%。生物柴油对温室气体排放的影响主要取决于排放控制技术的应用, 当生物柴油的含量增至 20%, 未配备后处理装置的发动机 CH_4 和 N_2O 的排放量会分别降低 18% 和 10%。然而在配备氧化催化剂的条件下, 使用 20% 的生物柴油, 对排气管温室气体排放无显著影响。采用柴油氧化催化剂和活性再生柴油微粒过滤器两种后处理技术均会导致 N_2O 排放量增加, 但 CH_4 的排放量基本保持不变。无后处理设备的重型柴油车排放的 CO_2 在温室气体中占主要地位, CH_4 占 CO_2 当量温室气体排放量的 0-11%, N_2O 则为 0.16-0.27%。研究得出的数据充分表明, 加拿大重型柴油和天然气车 CH_4 和 N_2O 排放因子大大低于 IPCC 推荐使用的发展中国家清单中的数值。

4 福特公司机动车 CH_4 排放研究案例^[7]

E.K.NAM 等按照美国环保局城市测功机行驶规范 (UDDS, Urban Dynamometer Driving Schedule) 在密歇根迪尔伯恩的福特车辆排放研究实验室利用底盘测功机对 30 辆机动车进行了 CH₄ 排放测试研究。测试车辆包括 18 辆分别来自于福特、本田、大众、沃尔沃四个不同制造厂商的轿车以及 12 辆卡车 (11 辆福特和 1 辆道奇公羊), 而且所有车辆都配备了现代化的三元催化系统, 车型年份为 1995-1999 年不等, 使用燃料为美国认证燃料 (cert)、加州新配方燃料 (CRF)、压缩天然气 (CNG)、M-85 (85% 甲醇, 15% 汽油)、E-85 (85% 乙醇, 15% 汽油) 和美国 2 号柴油 (diesel) 6 种。结果表明, 美国道路机动车 CH₄ 平均排放因子是 12±3 mg/km (19±5 mg/mi), 其中卡车排放因子比轿车约高出 40%, CNG 动力车尾气 CH₄ 平均排放因子 (轿车: 43±4 mg/km, 卡车: 97±5 mg/km) 数倍于常规燃料车辆。

5 美国轻型汽油车 N₂O 排放测试^[8]

Tao Huai 等依据美国联邦测试规程共研究测试了 60 辆轻型汽油车的 N₂O 排放状况。试验车辆从无催化剂型到超低排放车辆 (SULEV), 包括轿车和轻型卡车 (品牌: 通用、福特、克莱斯勒、本田、丰田和日产)。除了标准的美国 FTP (Federal Test Procedure) 工况外, 还对这些车辆在 US06 工况, ST01 冷启动工况、ST01 热运转工况和 MEC01v7 工况下的排放性能进行了研究。实验得出, 车辆排放差异较大, 这主要取决于排放控制技术、运行工况以及汽油中的硫含量等。实验中实时数据显示, N₂O 主要形成于催化剂的起燃阶段, 当催化剂达到平衡温度时, N₂O 排放量显著下降。FTP 工况下, 近一半的车辆 (25 辆) N₂O 排放水平在 10 mg/mile 以下, 氧化催化剂车辆的 N₂O 排放最高, 为 115 mg/mile, 而 ULEV 车辆为 3 mg/mile, SULEV 车辆为 1 mg/mile。在所有运行的工况来看, 冷启动工况 ST01 是 N₂O 产生量最多的工况。这可能是由于催化剂刚开始工作时温度降低, 导致产生大量的 N₂O, 而在 US06 工况, MEC01v7 工况和热运转 ST01 工况下, 由于催化剂达到了平衡温度, N₂O 的排放量达到较低的水平 (<5mg/mile)。汽油含硫量也是形成 N₂O 的重要原因, 当汽油中硫的含量从 30ppm 增加到 330ppm 时, 对于 FTP 工况和 US06 工况, 车辆 N₂O 的排放会有几乎增长 4 倍。

由研究结果可以推断：随着汽车排放标准日益苛刻和汽油含硫量的限制，汽车 N₂O 排放量将会稳定下降。

6 美国加州轻型机动车 N₂O 排放试验^[9]

Eduardo Behrentz 等在加州空气资源局利用底盘测功机研究测试了 37 辆轻型机动车，并通过高分辨率的傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测定了 N₂O 的排放量。这 37 辆机动车包括轿车、SUV 和轻型卡车 3 个类型，代表了加利福尼亚的典型车辆。根据文献调研得出，以下几个因素对车辆 N₂O 排放具有显著影响：运行工况 (UDDS, UC)、燃料类型 (含硫量)、催化剂类型 (氧化性催化剂、三元催化剂、催化剂床数)、行驶里程以及车辆类型 (轿车、轻型卡车) 等。然而，与其他研究结论不同的是，本次试验并没有数据表明催化剂的老化对 N₂O 的排放产生影响，而催化剂的类型、运行工况和车辆类型等则是汽油车 N₂O 排放量大小的主要决定因素。研究得出，37 辆测试车辆 N₂O 平均排放因子为 20±4 mg/km，其中在 FTP-UDDS 工况下测定的配备有三元双床催化剂和预催化剂，行驶里程低于 3000km 的 2001 年型轿车 N₂O 排放量最低，为 2 mg/km，而在 UC 工况下测得的仅配备三元单床催化剂，行驶里程大于 20×10⁴km 的 1991 年型轻型卡车排放量最高，可达 100 mg/km。机动车尾气 N₂O 排放量与 NO_x 排放量具有极高的相关性，该研究结果为 N₂O/NO_x 的平均值为 0.095±0.035，最低 (0.01) 和最高 (0.14) 相差 14 倍。随着机动车尾气 NO_x 控制技术的严格，轻型汽车 N₂O 的排放因子将会继续降低。

7 福特汽车公司机动车 N₂O 排放研究案例^[10]

评估机动车尾气对全球环境的影响需要准确的排放数据，包括 N₂O 的排放量在内。机动车排放 N₂O 对全球变暖的影响是机动车排放 CO₂ 环境效应的 1~3%，估计全球机动车 N₂O 年排放量可达 0.18±0.06 百万吨 (0.11±0.04 N, Tg yr⁻¹)，在大气环境中 N₂O 的年增长率为 2~6%。K. H. BECKER 等在德国伍珀塔尔 kiesbergtunnel 开展了测定机动车尾气 N₂O 排放的隧道试验。在隧道中使用全自动 GC/ECD 和数据采集系统，得到 N₂O 排放因子 (6.1±1.2)×10⁻⁵(N₂O,g /CO₂,g)。1996 年~1997 年，T. E. JENSEN 等在福特汽车公司车辆排放实验室利用底盘测功

机测量了标准工况下 22 辆不同汽车和卡车的 N₂O 排放量。这些测试车辆都配备了现代化的三元催化转化剂系统，使用燃料为美国认证燃料 (cert)、加州新配方燃料 (CRF)、压缩天然气 (CNG)、M-85 (85%甲醇, 15%汽油) 和美国 2 号柴油 (diesel) 5 种, 车辆排放普遍符合美国第一阶段 (U.S. Tier1) 和加州低排放车辆的规定。与伍珀塔尔大学隧道试验不同的是, T. E. JENSEN 等对 N₂O 的测量采用的是傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), 实验结果为 N₂O 排放因子为 $(4.5 \pm 1.1) \times 10^{-5}$ (N₂O,g/CO₂,g)。鉴于数据测量所固有的分散性和不确定性, 在计算交通源 N₂O 排放清单时推荐使用 $(6 \pm 2) \times 10^{-5}$ (N₂O,g/CO₂,g) 作为 N₂O 平均排放因子, 这相当于百公里油耗 12~6 L (20-40 mi/U.S.gal) 的燃油经济型车辆 N₂O 的排放率为 16.8 mg/km。

8 北美轻型车 N₂O 排放研究^[11]

2001 年~2007 年间, 加拿大环境部和加州空气资源委员会在车辆排放实验室利用底盘测功机对轻型汽油车和轻型柴油车 N₂O 的排放因子进行了定量研究。测试车辆共 467 辆, 分为新车 (<6500 km) 和在用车 (6500~160,000 km), 使用燃料是低硫汽油 (<30 ppm) 及低硫柴油 (<300 ppm), 所有车辆满足美国环保局和加州污染物排放标准 (Tier 0~Tier 2 Bin 3/SULEV)。研究表明, 轻型汽车和轻型卡车在相应标准下, 污染物排放差别不大。但是除了 Tier 2 车辆, 其他不同排放标准下车辆配备催化剂新、旧程度的不同对 N₂O 排放影响较大, 这可能是由于在本次研究中 Tier 2 标准车辆行驶里程较低, 车龄较小。另外, 配备氧化催化剂的车辆 N₂O 排放高于无催化剂车辆的 2-3 倍。FTP 工况下, 测定的汽油车 N₂O 排放因子严于美国第一阶段标准 (Tier 1), 低于美国和加拿大 2005 年制定的排放清单。机动车尾气 N₂O 排放因子的大小与 NMHC 或 NMOG (非甲烷有机物) 排放水平有着非常显著的相关性, 而与 NO_x 和 CO 排放水平的相关性则不是很显著。

9 瑞士 Gubrist 隧道实验研究道路交通制冷剂的排放^[12]

Stemmler Konrad 等通过瑞士 Gubrist 隧道排放实验对道路交通制冷剂 CFC-12 (CCl₂F₂), HCFC-22 (CHClF₂) 和 HFC-134a (CF₃CH₂F) 进行了定量研

究。这些气体均属于温室气体，主要被用作汽车空调系统（A/C-systems）和冷藏运输的制冷剂。测试在苏黎世地区进行，包括大量的私家车，可代表欧洲典型汽车车队的车辆构成。研究得出，各制冷剂平均排放因子是 CFC-12, 10 ± 0.2 mg/h; HCFC-22, 0.6 ± 0.4 mg/h; HFC-134a, 6.2 ± 0.8 mg/h。这些排放因子是指行驶过程中车辆的排放，代表了各类型车辆（无论是否装备空调系统）的平均排放水平。然而，当认为安装 HFC-134a-A/C 空调系统的车辆占总调查车辆的 45%，安装 CFC-12-A/C 的车辆约为 3~5%，仅考虑安装空调系统的车辆，排放因子则是 HFC-134a, 14 mg/h; CFC-12, 20~30 mg/h。研究表明，HFC-134a 和 CFC-12 主要归因于乘用车的空调系统的排放，而 HCFC-22 排放则是由运输卡车的冷藏系统所致。

10 机动车 R-134a 排放研究案例^[13]

福特汽车公司的 W.O.SIEGL 等研究人员首次对现代车辆空调系统制冷剂 R-134a（HFC-134a）的泄漏进行了研究。根据美国环保局（联邦）扩展昼夜测试程序，研究采用密闭蒸发测定装置（SHED）共测试了福特、丰田、戴姆勒-克莱斯勒、通用汽车和本田 5 个制造厂商的 28 辆轻型车。所有车辆在发动机和空调系统处于关闭状态的情况下进行为期 2 天的 R-134a 泄漏测试，定量测定使用 GC/FID。测试结果表明，R-134a 泄漏率为每天 0.01~0.36 g，平均 0.07 ± 0.07 g/day。若将行驶、维修和处置也考虑在内，配备空调系统的机动车整个生命周期 R-134a 的平均排放量可达 0.41 ± 0.27 g/day，其中车辆维修和处置两个阶段排放占有绝大部分。假设每辆车每年行驶 10000 英里，配备空调系统的机动车 R-134a 排放量对全球变暖的影响约为机动车排放 CO₂ 的 4~5%。

11 轻型机动车空调制冷剂排放研究综述^[14]

机动车排放的污染物有 CO₂、CO、NO_x、HC、PM、HFC-134a、CH₄ 和 N₂O 等，其中 CO₂、HFC-134a、CH₄ 和 N₂O 均是温室气体（GHGs）。由于 CFC-12（氟利昂）对臭氧层具有破坏作用，所以选用 HFC-134a 替代 CFC-12 作为车用空调系统的制冷剂。机动车 HFC-134a 排放主要分为四种形式：正常状况（regular）、异常状况（irregular）、维修（servicing）和废弃处置（disposal）。正常状况指的

是从软管和密封件的缓慢泄漏；异常情况是指系统故障造成的 HFC-134a 损失。正如其名所示，维修和处置是车辆在维修和废弃处置过程中 HFC-134a 的损失。SCHWARZ 等（2001）研究得出每辆车 HFC-134a 的总排放量（即所有形式）为 0.24 ± 0.06 g/day，而 SIEGL 等（2002）估算出的总排放量则为 0.41 ± 0.27 g/day。SCHWARZ 和 HARNISH (2003) 得出正常状况和异常状况的总和为 0.19 g/day，STEMMLER 等（2004）则将正常和异常两种形式的排放量确定为 0.336 g/day。VINCENT 等（2004）估计 HFC-134a 总排放量为 0.24 g/day。由于试验可能存在的不确定性导致了上述实验结果的差异。假设空调车的排放因子是 0.3 ± 0.1 g/day，每年行驶 10000 英里（16000 公里），油耗是 25 英里每加仑（9.5 升每百公里），HFC-134a 的全球变暖潜势为 1300，SIEGL 等（2002）认为配备空调系统的机动车泄漏的 HFC-134a 对全球变暖的影响程度约为机动车排放 CO₂ 的 2~5%。

第 2 章 测试方法及数据分析

2.1 车辆信息

本研究于 2012 年 5 月至 2013 年 6 月在中国环境科学研究院构建了多功能机动排放测试系统，基于目前北京市主要行驶车辆进行采样分析。通过调研对测试车辆进行分类，并统筹结合目前机动车温室气体排放的特征选择车辆进行台架和道路排放测试。

CH₄ 测试的轻型汽油车共 19 辆，其中国 IV 车 10 辆，国 III 车 7 辆，国 II、国 I 前车各一辆。所选车辆以北京地区在用车为主，汽车品牌以大众、北京现代、上汽通用、东风等品牌为主，包含合资车及国产车，未包含进口车，大部分车型是目前北京地区主流的家用车；排量以 1.6~2.4 L 为主，行驶里程分布于 $1 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4$ km 之间。

CH₄ 测试的天然气-汽油双燃料车共 25 辆，均为在不同城市运营的出租车。车辆品牌为大众、天津一汽、长安铃木、起亚、东风雪铁龙等，包括原厂 CNG 车辆和自行改装 CNG 车辆；排量以 1.8~2.4 L 为主，行驶里程覆盖 $1 \times 10^3 \sim 60 \times 10^4$ km。截至本研究结束，经过测量和采样的所有车辆详细信息如下表所示：

表 2-1 CH₄ 排放因子测试的轻型汽油车信息

序号	车型信息	行驶里程 (km)	备注
车 1	别克	50465	GC
车 2	桑塔纳	84764	GC
车 3	东风风行	36461	GC
车 4	东风风行	39179	GC
车 5	东风风行	35386	GC
车 6	东风风行	44175	GC
车 7	桑塔纳	207312	GC
车 8	别克	76527	GC
车 9	雪弗兰	47925	GC

车 10	雪铁龙	85419	GC
车 11	雪弗兰	44263	GC
车 12	北京现代	76864	GC
车 13	别克	21258	Horiba
车 14	速腾 FV7206	66730	Horiba
车 15	夏利 CSA718MC	92542	GC
车 16	伊兰特 BH7167AY	19029	GC
车 17	本田 HG7248	138067	GC
车 18	索纳塔 BH7200MX	99502	GC
车 19	速腾 FV7146TAR	76582	GC

表 2-2 CH₄ 排放因子测试的天然气-汽油双燃料车信息

序号	车型	行驶里程(km)	CNG 技术
车 1CNG	桑塔纳	10000	原装
车 2CNG	捷达	14000	改装
车 3CNG	威志	27000	原装
车 4CNG	桑塔纳	27000	原装
车 5CNG	桑塔纳	31000	改装
车 6CNG	桑塔纳	32000	原装
车 7CNG	捷达	54000	原装
车 8CNG	长安铃木	63000	原装
车 9CNG	起亚远舰	70000	改装
车 10CNG	桑塔纳	76000	原装
车 11CNG	起亚远舰	91000	改装
车 12CNG	爱丽舍	106000	改装
车 13CNG	威志	108000	原装
车 14CNG	富康	111000	原装

车 15CNG	桑塔纳	118000	原装
车 16CNG	捷达	146000	原装
车 17CNG	捷达	228000	原装
车 18CNG	长安铃木	230000	原装
车 19CNG	捷达	234000	原装
车 20CNG	捷达	239000	原装
车 21CNG	捷达	255000	原装
车 22CNG	桑塔纳	380000	改装
车 23CNG	长安铃木	483000	原装
车 24CNG	富康	620000	改装
车 25CNG	捷达	628000	改装

N₂O 测试的轻型汽油车共 24 辆，其中国 IV 车 14 辆，国 III 车 7 辆，国 II、国 I、国 I 前车各 1 辆。所选车辆以北京地区在用车为主，汽车品牌以大众、北京现代、上海通用、东风为主，大部分车型是目前北京地区主流的家用车；排量以 1.6~2.4 L 为主；行驶里程主要分布于 2×10⁴~9×10⁴ km 之间。

表 2-3 N₂O 排放因子测试的轻型汽油车信息

序号	车型信息	行驶里程	备注(测试方法)
车 1	伊兰特	19029	FT-IR
车 2	BUICK SGM252GL	21258	FT-IR
车 3	KIA 狮跑	26831	FT-IR
车 4	东风风行	35386	GC/ECD
车 5	东风风行	36461	GC/ECD
车 6	东风风行	39179	GC/ECD
车 7	东风风行	44175	GC/ECD
车 8	雪弗兰京 P5JL07	44263	GC/ECD
车 9	起亚 YQZ6430AE	46409	FT-IR

车 10	雪弗兰京 PV6F23	47925	GC/ECD
车 11	悦动	47996	FT-IR
车 12	标志 408	48708	FT-IR
车 13	纳瑞	61643	FT-IR
车 14	速腾 FV7206	66730	FT-IR
车 15	别克 鲁 AD177H	76527	GC/ECD
车 16	速腾 FV7146TAR	76582	FT-IR
车 17	北京现代	76864	GC/ECD
车 18	桑塔纳	84764	GC-ECD
车 19	雪铁龙	85419	GC-ECD
车 20	荣威 550 1.8T	92542	FT-IR
车 21	索纳塔	99502	FT-IR
车 22	雅阁 2.4 AT	138067	FT-IR
车 23	捷达	184101	FT-IR
车 24	桑塔纳京 AN8700	207312	GC/ECD

本研究中摩托车测试在天津内燃机研究所进行, 车辆的选择覆盖踏板、弯梁、骑式和轻便摩托车; 基本覆盖市售摩托车种类。其中 WH110T 踏板摩托车为 2009 年出厂无触媒(无排放后处理)车辆, 其余 5 台摩托车均为 2011~2012 年出厂安装有排放后处理的车辆。6 台摩托车均为天津内燃机研究所测试车辆, 行驶里程均为 6000km 左右, 排量为 48cc~150cc 市售民用摩托车。

表 2-4 摩托车测试车辆信息

车型信息	行驶里程 km	出厂日期	有/无触媒
WH110T 踏板	6000	200901	无
JF48QT-5C 轻便	5000	201101	有
HJ150-2A 骑式	6000	201103	有
HJ110-A 弯梁	6000	201103	有

WH125-12 骑式	6000	201201	有
CM125T-4V 踏板	6000	201205	有

2.2 测试及采样平台

2.2.1 轻型车测试平台

本实验中所有轻型车车辆采样测试均在中国环境科学研究院在用车排放实验室和汽车性能实验室进行，本实验室轻型车尾气的样品采集采用 HORIBA 整车排放测试系统（如图 2-1）和便携式车载排放测试系统（PEMS，如图 2-2）。

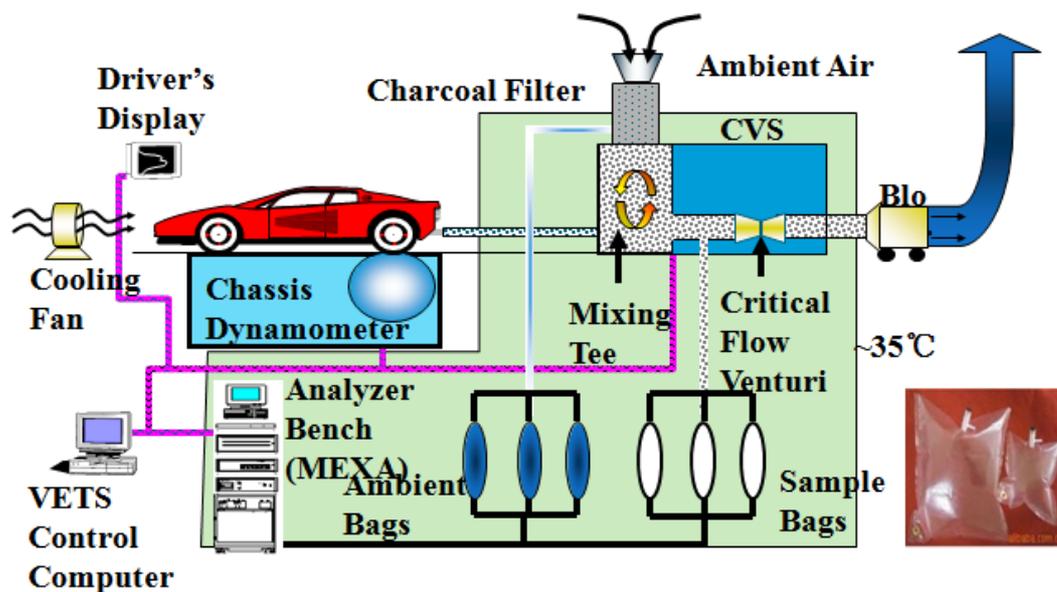


图 2-1 轻型汽车排放检测系统

轻型车整车排放系统由底盘测功机、分析模块、全流稀释系统和控制系统组成。本研究在实验过程中将 HORIBA 的采样袋进行改造，与实验所需的特氟龙采样袋用大气采样泵进行连接，在整车排放系统对车辆完成测试之后收集剩余气体待检测。

采用便携式车载排放测试系统（PEMS）进行温室气体采样同样基于底盘测功机，在轻型车在底盘测功机上完成固定测试工况的同时在 PEMS 稀释系统尾端连接特氟龙采样袋收集尾气随后使用仪器进行检测。

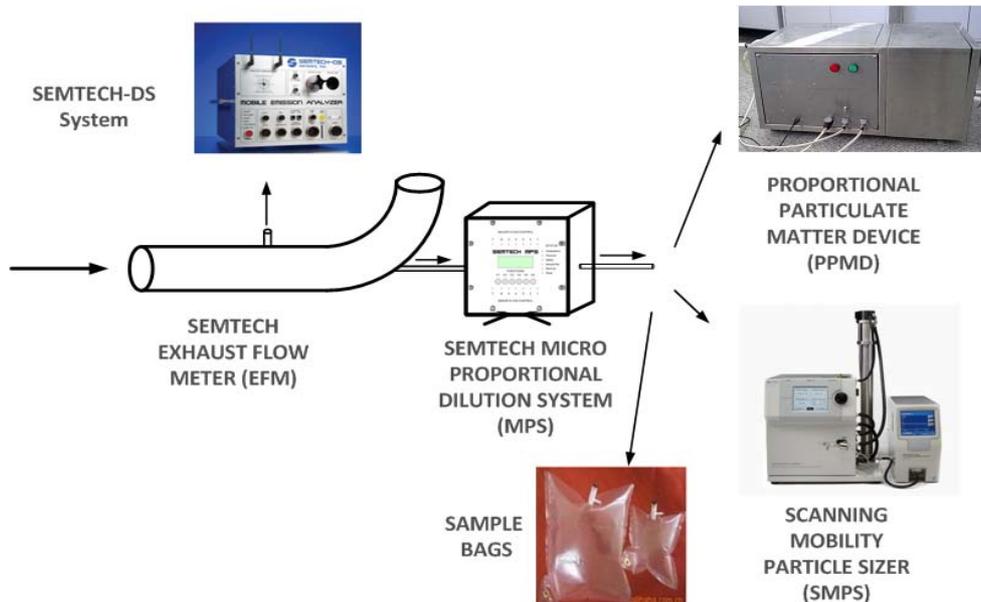


图 2-2 便携式尾气&颗粒物等比例稀释采样系统

该系统的技术关键在于保证采样的等比例性，即采样流量随尾气流量实时变化时具有良好的相关性。因此，在现场实验时需根据尾气实际流量先调节等比例性，当采样流量和尾气流量的相关系数达到 0.95 以上时，表明采样的等比例性良好，方可进行尾气颗粒物稀释采样。该系统所用的 MPS 曾在美国环保局实验室与 CVS 全流稀释采样系统进行对比，发现两者的采样结果偏差较小，验证了 MPS 的采样方法可靠。目前，已使用该系统在北京对部分工程机械的尾气颗粒物进行了现场采样，等比例稀释采样情况良好(如图 2-3 所示，相关系数达到 0.95 以上)，为今后开展实际道路的机动车尾气颗粒物排放测试奠定了基础。

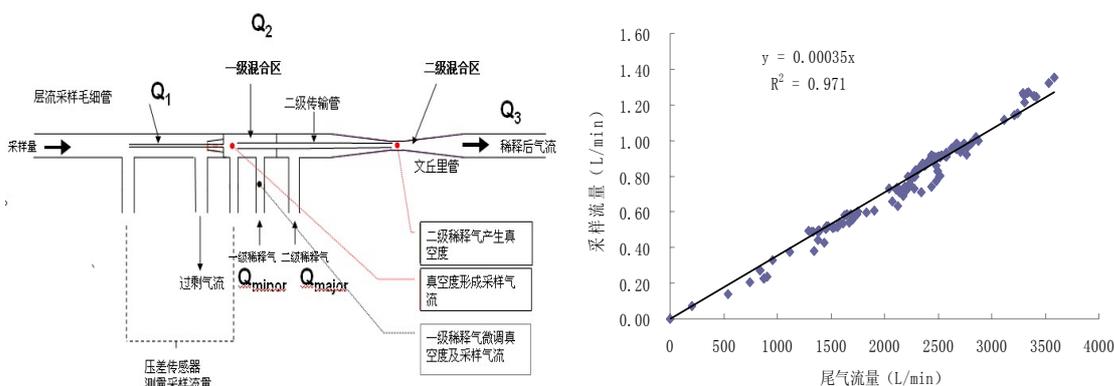


图 2-3 等比例采样示意图



图 2-4 收集机动车尾气所使用的采样袋

轻型汽油车测试：轻型车由于车辆内部空间所限，均为整车台架测试。瞬态测试按 GB18352.3-2005 中的实验方法进行，采用 NEDC 实验循环作为车辆的运转程序，如图 2-5 所示。整个实验由 NEDC 实验循环组成，共持续 1200 秒。NEDC 循环由两部分组成：实验 1 部分由 4 个城区循环 ECE15 工况组成，每个城区循环包含 15 个工况(怠速、加速、匀速、减速等)；试验 2 部分由 1 个城郊循环(EUDC)组成，该城郊循环包含 13 个工况（怠速、加速、匀速、减速等）。同时利用车载尾气分析仪 SEMTECH-DS 和车载尾气流量计 SEMTECH-EFM 分别对尾气的气态污染物和尾气的排气流量进行测试并记录。

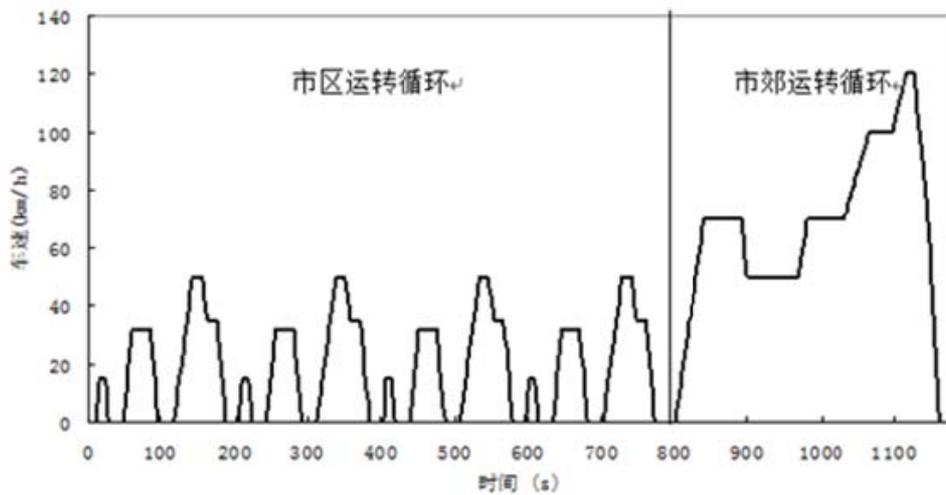


图 2-5 轻型车测试工况



图 2-6 轻型车测试现场图

2.2.2 重型车测试平台

由于测试时间和地点等因素限制，本研究仅对 2 辆重型车进行了测试，在车辆方面选取目前保有量相对较多的国Ⅲ车辆进行测试，并且在测试过程中分为高速工况、快速工况和低速工况进行，各种工况的车速分布如图 2-7 所示。重型车排放测试路线如图 2-8 所示，基本代表了北京市及周边的典型路况，重型车 CH_4 和 N_2O 的采样现场情况见图 2-9。

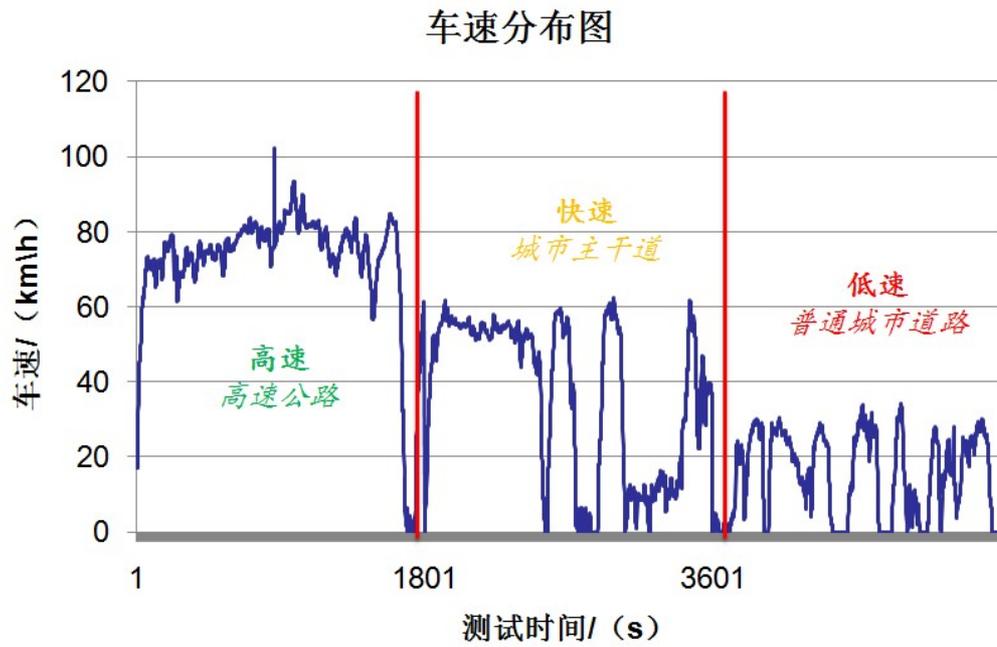


图 2-7 重型车排放测试车速分布示意图



图 2-8 重型车排放测试路线图



图 2-9 重型车排放测试现场图

2.2.3 摩托车测试平台

本研究中摩托车测试在天津内燃机研究所进行，该测试地点拥有底盘测功机、排放试验室，是供摩托车进行工况法排放及怠速法排放测试的专用试验室，试验间安装有独立空调调节系统，满足国家标准中测试环境温度 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的要求。试验室配备有科达测器制造的 DPC-1 测功机一部，德国 SIEMENS 公司制造的底盘测功机一部，德国 PIERBURG 公司制造的稀释排气测量系统、废气分析仪（AMA4000），德国 SIEMENS 公司制造的稀释排气测量系统及废气分析仪（SIGS504）。检测条件符合 GB14622-2002，GB17186-2002，GB14621-2002，97/24/EEC C5 的规定。底盘测功机能够完成基准质量 $\leq 400\text{ kg}$ 的各种两轮、三轮摩托车和轻便摩托车排放试验，最大功率：37 kW，最高试验车速：120 km/h。能够采用多种方式阻力设定，完成包括排放等各种摩托车性能测试。

摩托车 CH_4 和 N_2O 排放的测试循环如图 2-10 所示，测试的底盘测功机和现场测试情况见图 2-11 和图 2-12，测试摩托车的详细信息如表 2-4 所示。

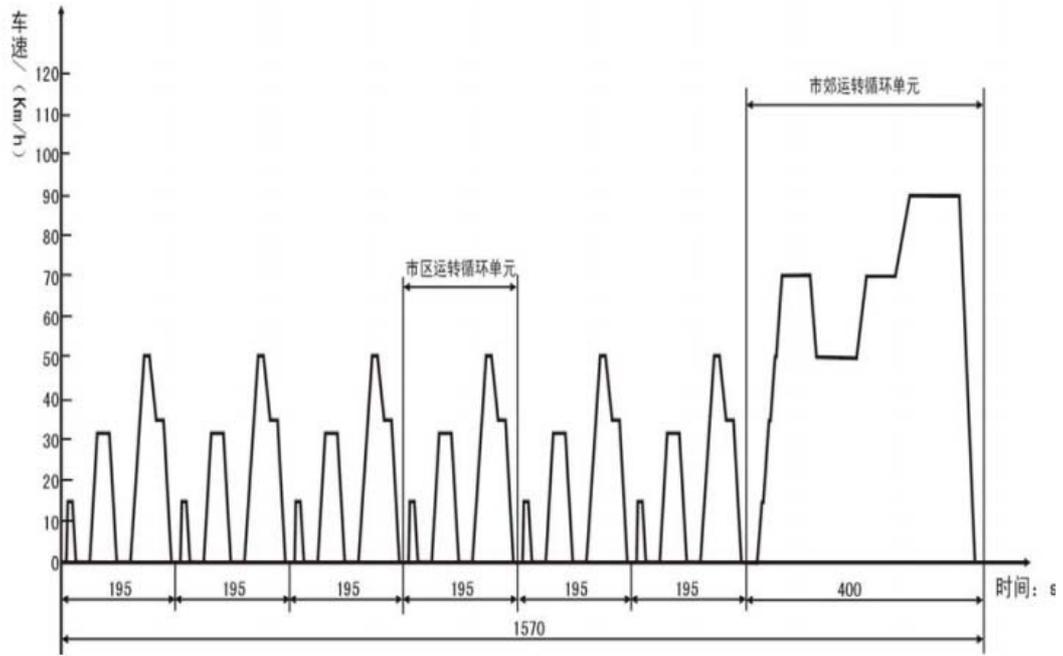


图 2-10 摩托车排放测试循环

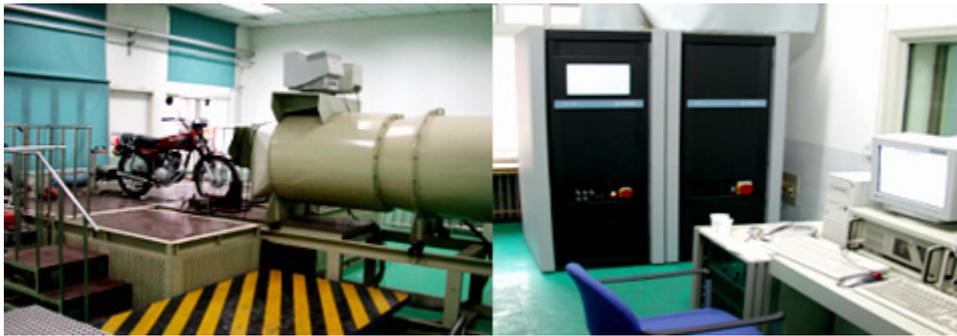


图 2-11 摩托车底盘测功机



图 2-12 摩托车测试现场图

2.3 样品分析平台

2.3.1 CH₄ 和 N₂O 排放因子计算方法

通过气袋采样的汽车尾气 CH₄ 和 N₂O 样品尽量在采样完成后 96 小时内完成检测。所有仪器测试所得的结果均根据下面的计算公式进行计算。

$$EF = \frac{\text{Sample.conc.} - \text{Ambient.conc.} \left(1 - \frac{1}{DF}\right)}{\text{Dist}} \times M \times k$$

EF= Emission Factor (排放因子)

DF= Dilution Factor (稀释因子)

Dist=Distance travelled during the test (测试所行驶的距离)

M=Molecular weight (分子量)

k=constant coefficient (比例常数)

2.3.2 样品分析方法

气相色谱法 (本实验主要测试方法)

气相色谱仪是目前运用很广泛的分离检测工具。它的工作原理是利用样品中各组分在气相和固定相间的分配系数不同,当汽化后的样品被载气带入色谱柱中运行时,组分就在其中的两相间进行反复多次分配,由于固定相对各组分的吸附能力不同,各组分在色谱柱中的运行速度就不同,经过一定的柱长后,便彼此分离,按顺序离开色谱柱进入检测器,产生的离子流讯号经放大后,在记录器上描绘出各组分的色谱峰。

氢火焰离子化检测器 (FID):

氢火焰离子化检测器 (FID) 是典型的破坏性、质量型检测器,是以氢气和空气燃烧生成的火焰为能源,当有机化合物进入以氢气和氧气燃烧的火焰,在高温下产生化学电离,电离产生比基流高几个数量级的离子,在高压电场的定向作用下,形成离子流,微弱的离子流 ($10^{-12} \sim 10^{-8}$ A) 经过高阻 ($10^6 \sim 10^{11}$ Ω) 放大,成为与进入火焰的有机化合物量成正比的电信号,因此可以根据信号的大小对有机物进行定量分析。其主要特点是对几乎所有挥发性的有机化合物均有响应,

对所有烃类化合物（碳数 ≥ 3 ）的相对响应值几乎相等，对含杂原子的烃类有机物中的同系物（碳数 ≥ 3 ）的相对响应值也几乎相等。这给化合物的定量带来很大的方便，而且具有灵敏度高（ $10^{-13} \sim 10^{-10}$ g/s），基流小（ $10^{-14} \sim 10^{-13}$ A），线性范围宽（ $10^6 \sim 10^7$ ），死体积小（ $\leq 1 \mu\text{L}$ ），响应快（1 ms），可以和毛细管柱直接联用，对气体流速、压力和温度变化不敏感等优点，所以成为应用最广泛的气相色谱检测器。

电子捕获检测器（ECD）：

电子捕获检测器（ECD）是灵敏度很高的气相色谱检测器，同时又是最早出现的选择性检测器。它仅对那些能捕获电子的化合物，如卤代烃、含 N、O 和 S 等杂原子的化合物有响应。由于它灵敏度高、选择性好，多年来已广泛用于环境样品中痕量农药、多氯联苯等的分析。ECD 工作原理是：由色谱柱流出的载气及吹扫气进入 ECD 池，在放射源放出 β -射线的轰击下被电离，产生大量电子。在电源、阴极和阳极电场作用下，该电子流向阳极，得到 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ A 的基流。当电负性组分从柱后进入检测器时，即捕获池内电子，使基流下降，产生一负峰。通过放大器放大，在记录器记录，即为响应信号。其大小与进入池中组分量成正比。由于负峰不便观察和处理，可通过极性转换为正峰。

2.3.3 CH₄ 测量

本实验中 CH₄ 测量数据分别用三种方法进行检测：

方法一：使用装配有 FID 检测器和毛细管柱的安捷伦 7890A 气相色谱进行测量。

方法二：利用温室气体进样仪取代普通色谱的进样系统，通过微机程序发出指令控制电磁阀开关，改变管线中压缩空气的方向，用以驱动汽缸转动进样阀，达到气相色谱仪分析气路系统自动进样、分析和清洗，从而在短时间内完成三种温室气体(CH₄/N₂O/CO₂)的同时分析。

方法三：在整车台架测试过程中直接使用 HORIBA 自带测试系统对车辆排放的 CH₄ 进行测量。



图 2-13 CH₄ 检测气相色谱&HORIBA 测量设备图

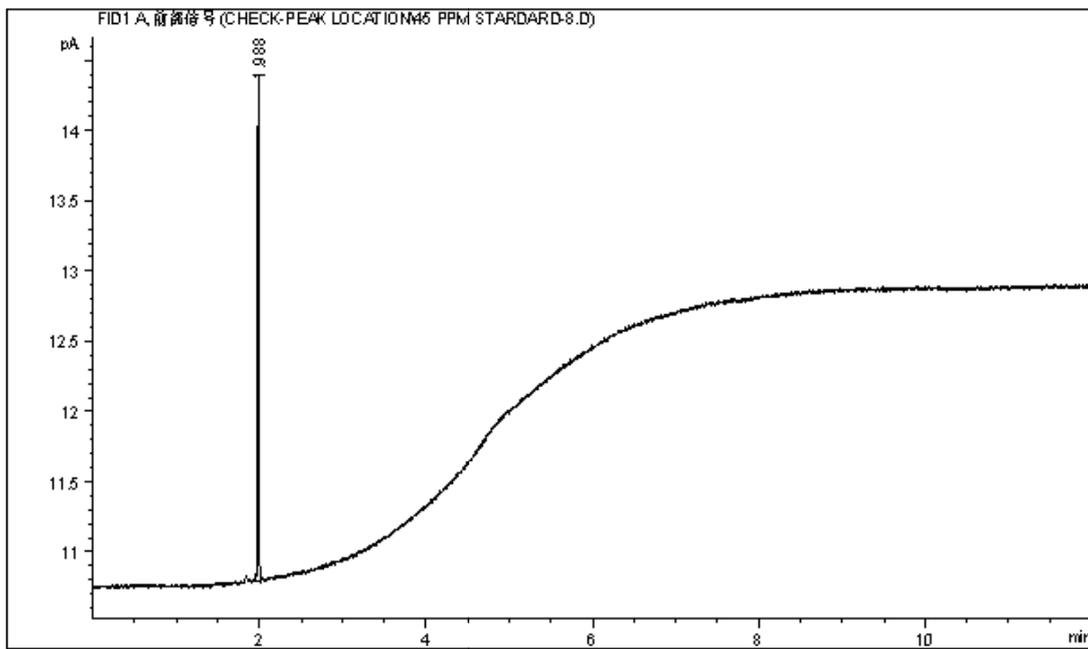


图 2-14 CH₄ 色谱测量谱图（方法一）

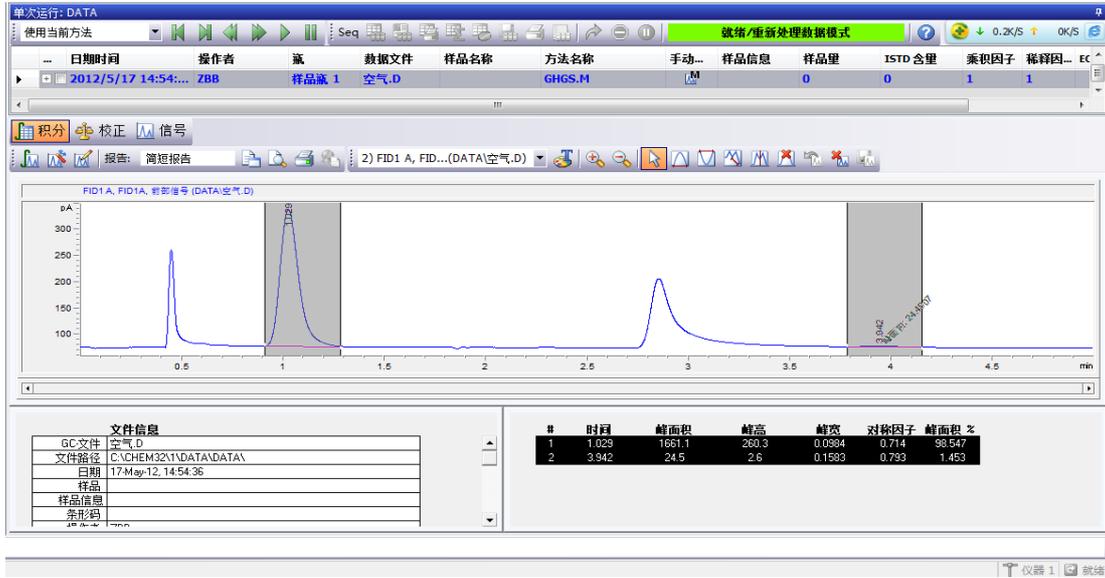


图 2-15 CH₄ 气相色谱图（方法二）

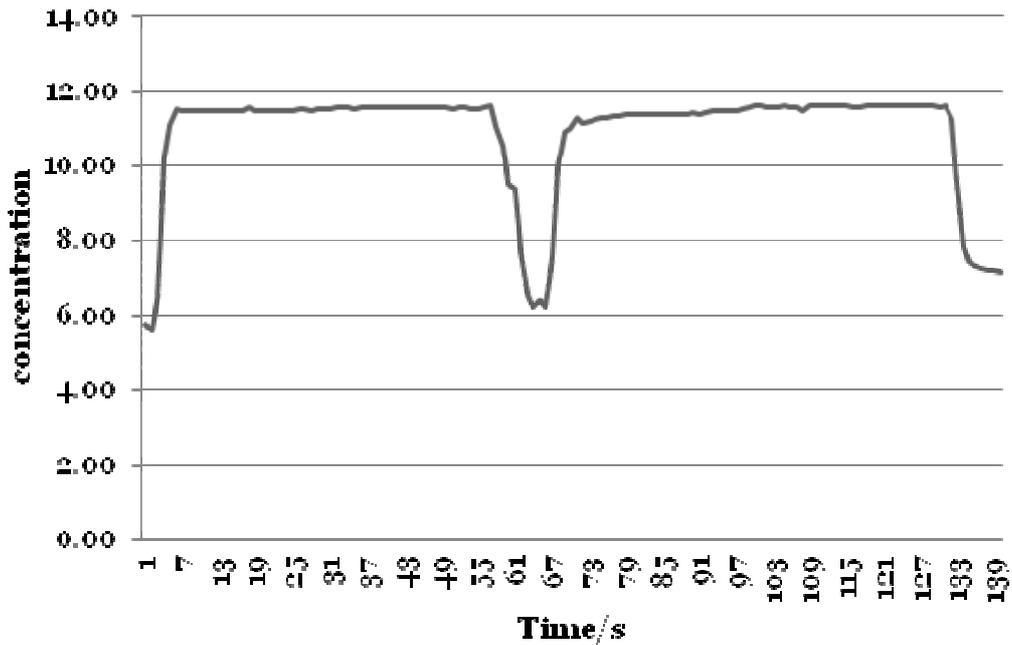


图 2-16 CH₄ 测量 HORIBA 设备检测图（方法三）

2.3.4 N₂O 测量

方法一：使用布鲁克公司生产配有液氮冷却的 MCT（汞铬碲检测器）检测器的 TENSOR27 红外光谱进行检测，测试方法源于加州空气资源局（California

Environmental Protection Agency Air Resources Board) [15], 测试光谱图及测试标准曲线如下图所示;

方法二: 使用配有电子捕获检测器 (ECD) 的安捷伦 7890A 气相色谱进行检测, 测试色谱图如下图所示。



图 2-17 布鲁克 TENSOR27 红外光谱和配备 FID&ECD 检测器的安捷伦 7890A 气相色谱

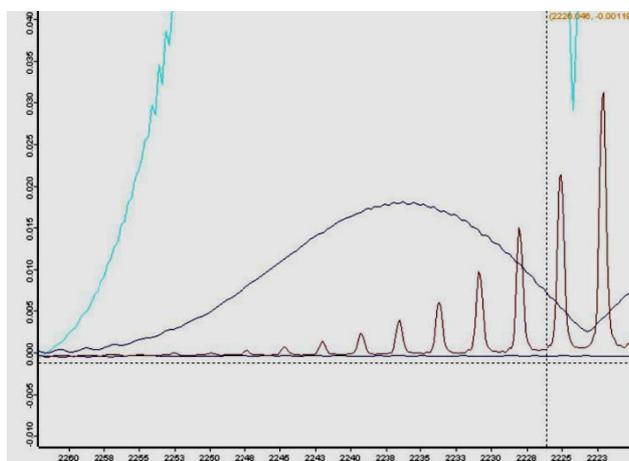


图 2-18 N₂O 的红外谱图 (方法一)

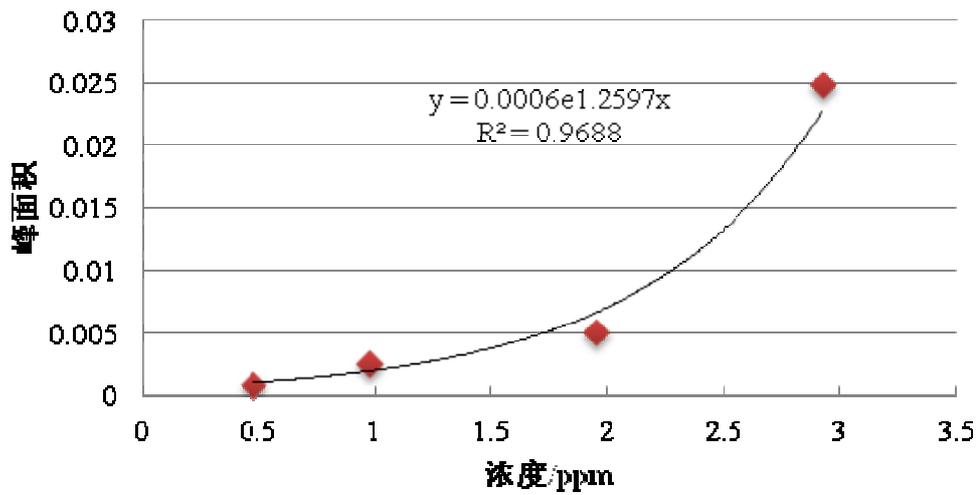


图 2-19 红外光谱检测 N₂O 的标准曲线（方法一）

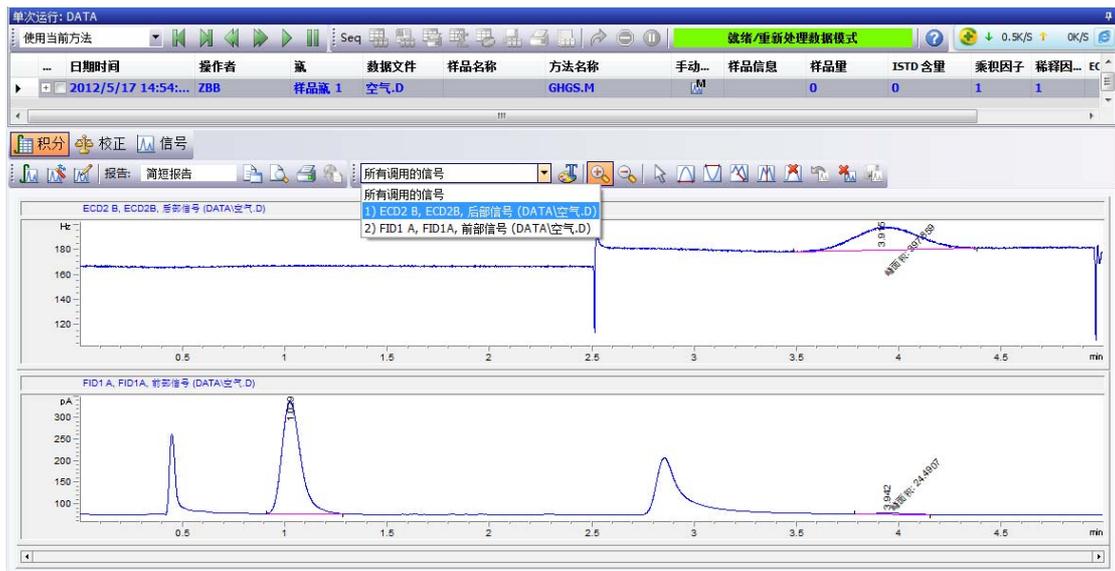


图 2-20 气相色谱同时分析 CH₄、N₂O 色谱图（方法二）

2.4 非 CO₂类温室气体排放因子

2.4.1 CH₄ 排放因子

本研究对北京市的轻型汽油车和不同城市的天然气-汽油双燃料出租车进行了 CH₄ 排放测试,结果如图 2-21 和图 2-22 所示。从轻型汽油车的测试结果来看,国 IV、国 III 以及国 II 前车辆的 CH₄ 排放因子逐渐增大,平均排放因子依次为 0.03

g/km、0.04 g/km 和 0.06 g/km，可见技术水平的提高和相关法规标准的完善能够在一定程度上对 CH₄ 排放进行有效控制。并且有 70%测试车辆的 CH₄ 排放因子低于平均值，说明国IV车辆的 CH₄ 排放相对其他老旧技术类型低。由于本研究车辆样本相对较少，只能部分反映目前 CH₄ 排放的状况，在今后的实验研究中将继续完善测试方法，补充测试车辆，以进一步了解 CH₄ 排放的实际情况。

在天然气-汽油双燃料出租车方面，由于北京市在本研究进行期间尚无此类车辆，因此在河北省廊坊市、山东省济南市、山西省阳泉市和重庆市，选取了共 25 辆双燃料出租车进行测试。其中，9 辆为自行改装天然气-汽油出租车，其余均为原装天然气-汽油出租车。从图 2-22 中可以看到，天然气出租车的 CH₄ 排放明显高于普通轻型汽油车，大概是汽油车的 10~50 倍。其原因可能是汽油发动机经过改造后使用天然气进行燃烧，一旦燃烧不够充分，就会出现 CH₄ 排放因子远远高于普通汽油车的情况。但目前我国天然气汽车的保有量和比例在机动车总保有量中还很低，因此天然气车的 CH₄ 排放影响还有待进一步分析。随着今后新能源车和替代燃料车等其他技术的大范围推广，其潜在的环境影响还需要进一步调查研究。

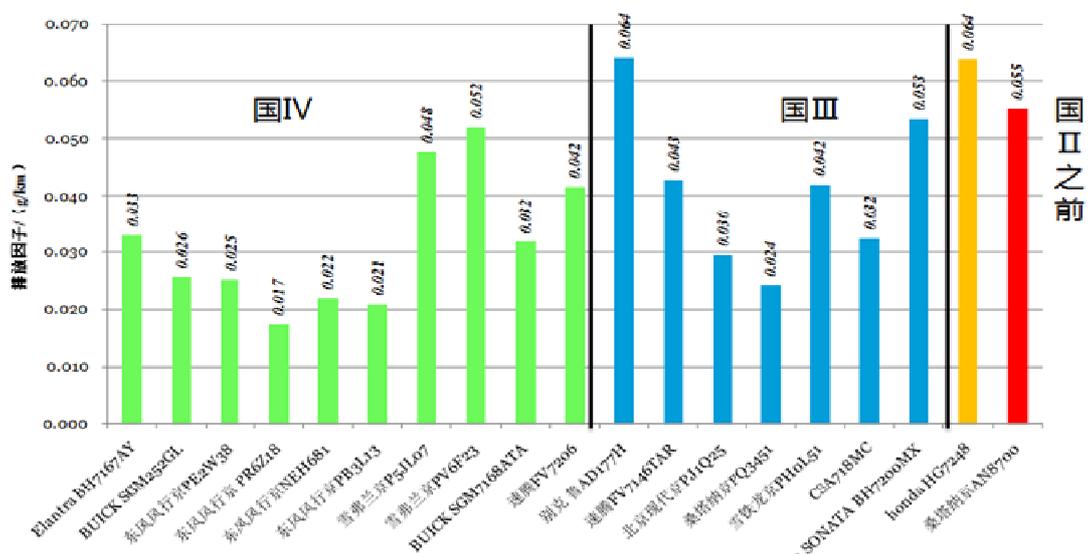


图 2-21 轻型轿车 CH₄ 排放因子

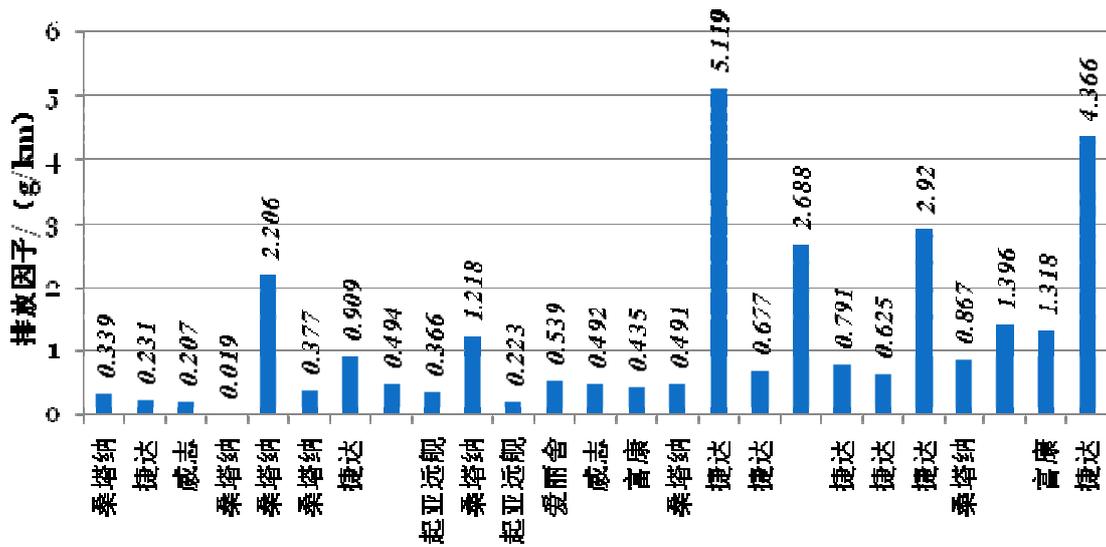


图 2-22 天然气出租车 CH₄ 排放因子

从摩托车的 CH₄ 排放测试结果看，其排放量不容忽视。目前我国摩托车的保有量已超过 1 亿辆，而测试结果表明，摩托车的 CH₄ 排放因子基本和轻型汽油车持平，也就意味着摩托车每行驶一公里排放的 CH₄ 基本等同于一辆轻型轿车所排放的 CH₄，尽管摩托车相对轻型汽车在行驶里程上较低（大概是后者的 1/3~1/4），但目前我国庞大的摩托车保有量加上较高的 CH₄ 排放因子，其排放总量给环境带来的压力是显而易见的。因此，在今后的工作中，应当对摩托车排放进行更加深入的研究。

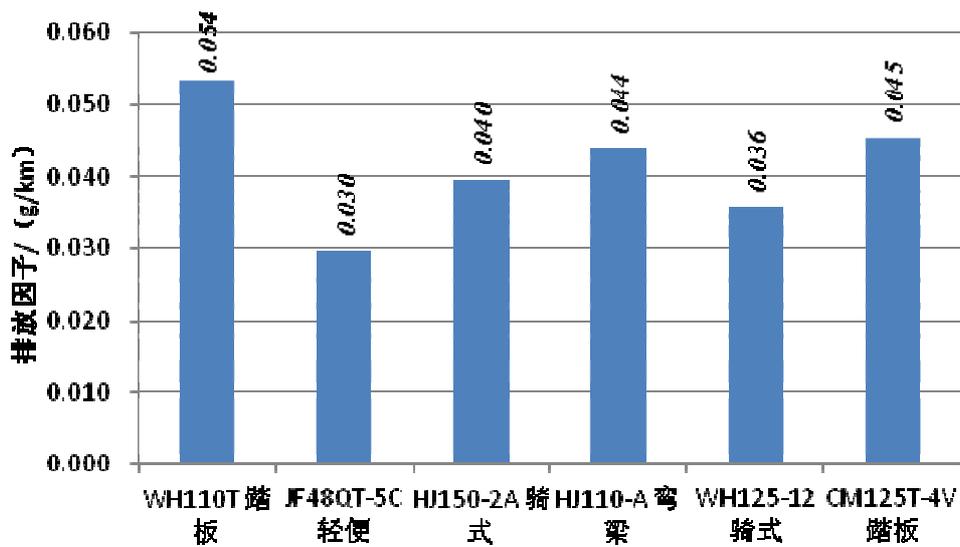


图 2-23 摩托车 CH₄ 排放因子

2.4.2 N₂O 排放因子

本研究中 N₂O 排放因子采用美国加州空气资源局的光谱法和装有 ECD 检测器的气相色谱法进行测量。从测试结果可以看出，轻型汽油车 N₂O 排放因子与技术水平的关系比较明显（图 2-24），技术水平领先的国IV和国III车的排放因子相对较低，其中国IV车的 N₂O 排放因子平均值为 0.02g/km，国III车排放因子平均值为 0.034g/km，国II之前的车辆排放因子为 0.04g/km。从 2000 年开始普遍采用的三元催化转化技术，在老化失效和冷启动时可能引起 N₂O 排放大幅增加。由于与二氧化碳相比，N₂O 的单分子增温潜势是二氧化碳的 310 倍，虽然 N₂O 在大气中的含量很低，但 N₂O 浓度的增加对全球气候的增温效应将越来越显著，已引起不少科学家的关注。

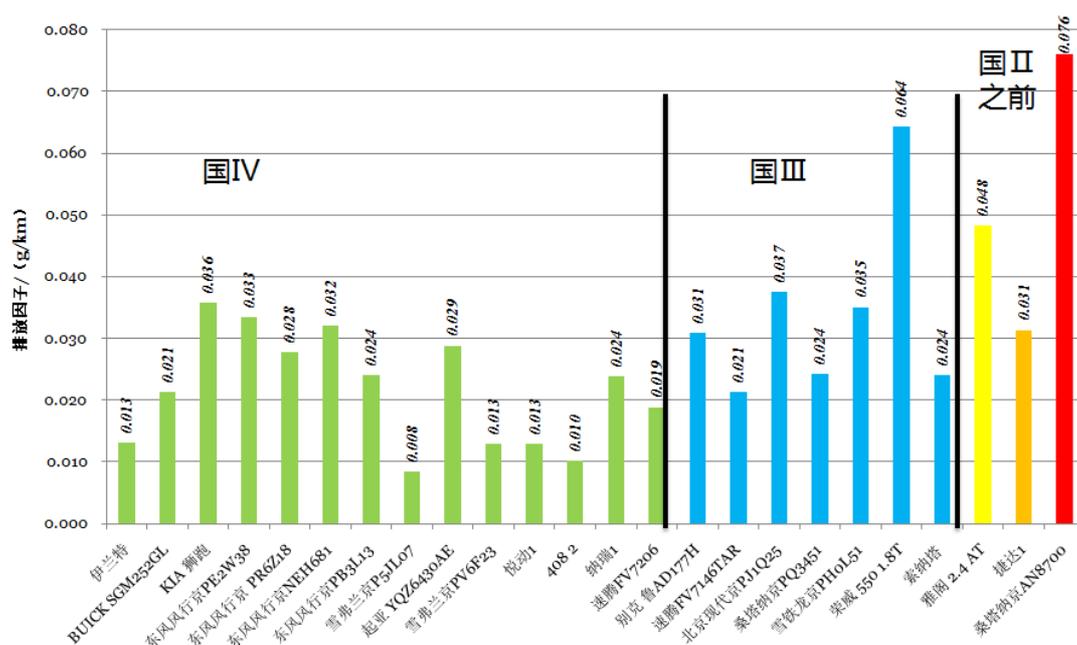


图 2-24 轻型汽油车 N₂O 排放因子

在对摩托车测试结果进行分析时也得出了与 CH₄ 排放类似的结果，即摩托车的 N₂O 排放与轻型汽油车接近（图 2-25）。由于摩托车的样本量相对较少，数据分析方法尚在开发阶段，因此如何测量和控制摩托车 N₂O 排放在今后的研究会进一步展开。

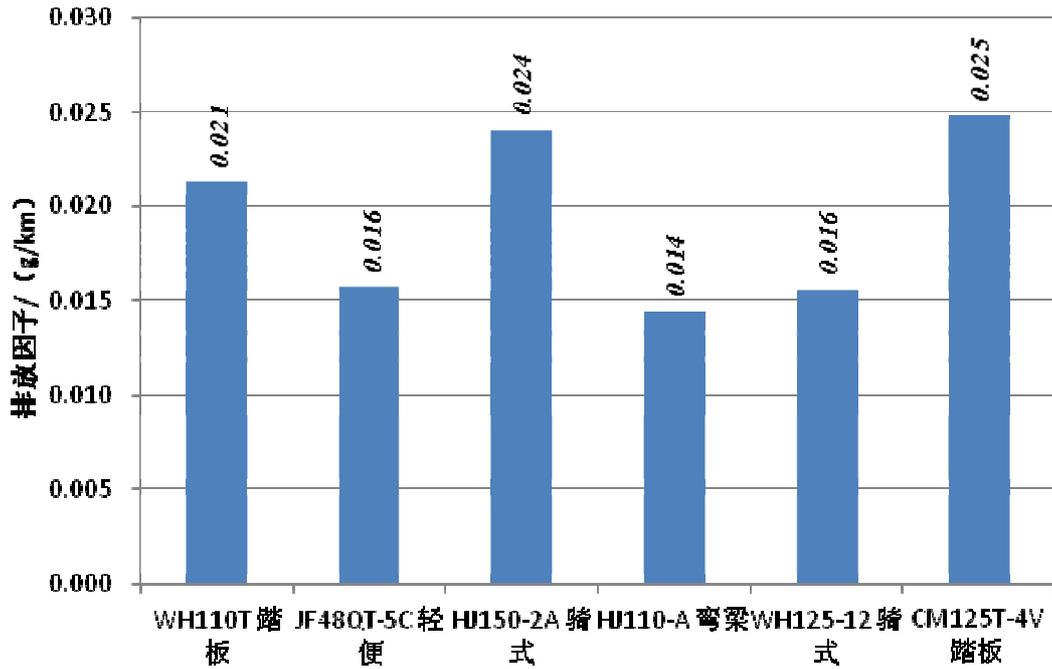


图 2-25 摩托车 N₂O 排放因子

在对重型车 N₂O 排放进行测试时发现，国III重型柴油车的 N₂O 排放相对轻型汽油车和摩托车较低（图 2-26），原因是目前我国的柴油车尚无排放后处理设备，尾气从发动机高温排出之后没有经过催化反应，因此产生 N₂O 的量相对轻型汽油车和摩托车偏低。

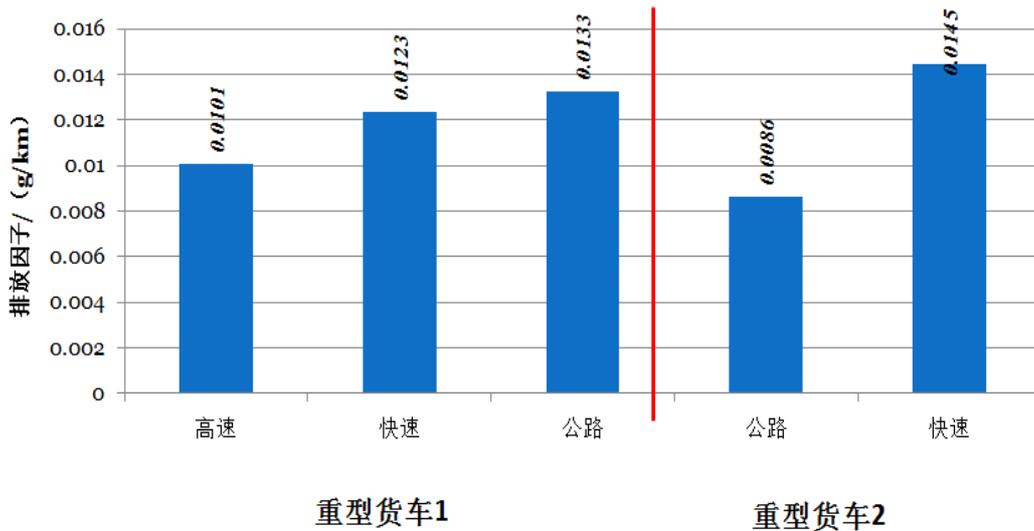


图 2-26 重型货车 N₂O 排放因子

2.5 小结

(1) 本章主要对本研究中所涉及的车辆信息、测试及采样平台、样品分析平台、排放因子结果四个方面进行了介绍，特别是对测试方法和结果分析进行了较为详细的阐述。

(2) 研究表明国III、国IV轻型汽油车的 CH_4 和 N_2O 排放因子，相对国II以前车辆的排放状况较好。说明采用更加先进的技术，推动发动机和排放后处理技术的进步，能够对非 CO_2 温室气体减排起到良好的作用；天然气车的 CH_4 排放显著高于同类汽油车，需要给予更多的关注。

(3) 摩托车的 CH_4 和 N_2O 排放因子和轻型汽油车相当，尽管摩托车的年均行驶里程较低，但是考虑到我国摩托车保有量巨大，因此对大气环境的影响是显而易见的。由于本研究所进行测试的车辆数量有限，因此在后续的工作中会继续研究其排放现状和减排途径。

(4) 重型车非 CO_2 类温室气体排放水平相对轻型汽油车较低，主要是由于重型柴油车本身未安装催化后处理装置，柴油发动机燃烧效率相对汽油车较高等。在后续研究中也应当对重型柴油车非 CO_2 类温室气体排放进行更加详细的研究。

第3章 中国机动车非CO₂类温室气体排放清单

目前,中国大部分机动车温室气体排放研究都集中于CO₂排放^[16-18],CH₄、N₂O和HFC-134a排放的相关研究很少,对三者的单车排放水平和总排放量更缺乏认识。由于没有足够的信息和技术支持,致使政府很难控制机动车CH₄、N₂O和HFC-134a的排放,所以有必要建立一份可靠的机动车非CO₂类温室气体排放清单。因此,本研究根据有关统计年鉴、年报以及政府发布的信息数据,利用各车型存活曲线函数解析得到按不同车型、燃料和车龄分布的机动车保有量;利用实地调查和相关文献资料获得相应的年均行驶里程;通过文献调研,并综合考虑中国机动车排放控制的发展进程以及车用油品的实际状况等因素对排放的影响,确定分车型、燃料和不同控制阶段的排放因子。基于上述分析结果,建立全国层面的机动车CH₄、N₂O和HFC-134a排放清单以期开展机动车非CO₂温室气体排放控制提供参考依据。

3.1 机动车CH₄和N₂O排放清单

3.1.1 研究方法

利用中国分年度的机动车保有量、年均行驶里程等基础数据,并结合文献调研获得的机动车排放因子,建立中国机动车CH₄和N₂O排放清单。机动车CH₄和N₂O排放总量采用式(1)进行计算。

$$Q_k = \sum_{ij} \sum_{n=1}^y \left(\frac{VP_{i,j,n} \times EF_{i,j,n,k} \times VKT_{i,j,n}}{100} \right) \quad (1)$$

式中, i 为车辆类型,包括汽车、摩托车和农用车,其中汽车可细分为轻型车、出租车、中型车、重型车; j 为燃料类型,包括汽油、柴油和天然气; k 为污染物类型,即CH₄与N₂O; y 为车辆报废年限; n 为车龄(取值范围由1到 y); Q_k 为 k 污染物的排放总量,10⁴t; $VP_{i,j,n}$ 为 i 车型 j 燃料 n 年车龄车辆的保有量,10⁴辆; $EF_{i,j,n,k}$ 为 i 车型 j 燃料 n 年车龄车辆的 k 污染物排放因子,g/km; $VKT_{i,j,n}$

为*i*车型 *j* 燃料 *n* 年车龄车辆的年均行驶里程， 10^4 km。

不同车型、燃料和车龄分布的机动车保有量通过对中国机动车污染防治年报（2011）^[19]、中国统计年鉴（2011）^[20]、中国汽车工业年鉴（2011）^[21]和交通运输部发布的相关数据^[22]等统计资料的调研结果综合确定。根据自 2008-2010 年在国内 10 余座典型城市（一线城市包括北京、广州；二线城市包括重庆、济南等；三线城市包括廊坊、阳泉等）对中国机动车活动水平（包括车辆类型、车型分布、年均行驶里程等）、排放后处理装置使用状况、车用油品质量等方面的实地调查结果，结合国内外对机动车年均行驶里程的模型测算^[23-26]、调查统计^[27-29]等研究成果，得到中国 2010 年分车型和分车龄的机动车年均行驶里程。以轻型汽油车为例，可将文献调研得到的数据代入经验公式〔见式（2）〕获得分车龄的年均行驶里程^[30-31]。影响机动车 CH₄ 和 N₂O 排放因子的因素很多，主要包括车型、车龄^[32]、车用燃料、尾气净化技术、排放标准和运行工况等。基于中国机动车排放标准执行时间和国内外相关研究中相似车型的排放因子数据等，确定各车型在不同排放控制水平下的平均排放因子；并根据车用油品质量对机动车 CH₄ 和 N₂O 排放的影响规律^[33-34]，对排放因子按式（3）进行相应的修正。

$$VKT_{n\text{ avg}} = A \cdot n^2 + B \cdot n + C \quad (2)$$

式中， $VKT_{n\text{ avg}}$ 为 *n* 年车龄机动车年均行驶里程， 10^4 km；*A*、*B*、*C* 为常数。

$$E = E_0 \cdot f(j, s, o, p) \quad (3)$$

式中，*E* 为根据中国车用油品质量修正而得的排放因子，g/km；*E*₀ 为依据文献调研数据获得的排放因子，g/km；*f*(*j*, *s*, *o*, *p*) 为修正系数；*s* 为燃料中的硫含量（其会导致催化剂的劣化）；*o* 为燃料有机组分构成比例；*v_p* 为燃料蒸汽压。

3.1.2 参数确定

3.1.2.1 车辆类型

不同类型的机动车在发动机类型、燃料类型、排放控制技术、车辆自重及车

辆用途等方面大不相同，导致活动水平和排放因子的巨大差异。为了准确计算不同类型机动车的污染物排放清单，必须对其进行合理分类。该研究基于中国现行机动车分类标准^[35]以及影响机动车 CH₄ 和 N₂O 排放因子的主要因素（如燃料类型、车辆用途等）对机动车类型进行划分，结果如表 3-1 所示。

表 3-1 机动车分类

分类		说明
轻型车	汽油	车长<6000 mm 且乘坐人数<9 人的载客汽车，或者车长<6000 mm
	柴油	且总质量<4500 kg 的载货汽车，但不包括三轮汽车和低速货车
出租车	汽油	由于出租车的年均行驶里程远高于其他轻型车以及燃料使用差异，
	天然气 ¹⁾	所以该研究将其从轻型车中分出来，单独作为一个车型考虑
中型车	汽油	车长<6000 mm 且乘坐人数为 10~19 人的载客汽车或者车长≥6000
	柴油	mm/总质量≥4500 kg 且<12000 kg 的载货汽车但不包括低速货车
重型车 ²⁾	柴油	车长≥6000 mm/乘坐人数≥20 人的载客汽车或者总质量≥12000 kg 的
	天然气	载货汽车
摩托车 ³⁾	汽油	由汽油发动机驱动
农用车	柴油	以柴油发动机为动力，主要指三轮汽车和低速货车

1) 根据实地调研，基本是天然气-汽油双燃料车，但实际运营中大多使用天然气，只有少数情况下使用汽油；

2) 在重型车中约 95%以上的车辆为柴油车，汽油车和天然气车所占比例很小，但天然气车 CH₄ 排放因子相对较高，故该研究将重型车分为柴油车和天然气车两类，以简化计算；

3) 对于摩托车，不区分其车重和冲程等差异，将其划分为一类。

3.1.2.2 机动车保有量

中国机动车保有量（见表 3-2）来源于政府部门各种统计年鉴或年报。由于这些统计数据 and 该研究车型划分存在差异，因此需要做进一步的处理：（1）根据车辆报废年限的有关规定，出租车报废年限为 8 a，摩托车报废年限为 8~10 a，商用车报废年限为 15 a，所以对机动车保有量进行统计分析时，为便于排放清单的测算而做了简化，将出租车车龄上限定为 8 a，摩托车车龄上限定为 10 a，其

它车型车辆定为 15 a；（2）以中国 1996-2010 年的汽油车和柴油车销售量数据为基础，测算出中国各车型中不同燃料车辆的比例；（3）基于历年各车型销售量，利用各车型存活曲线函数^[36-38]测算不同车龄的机动车分车型保有量。

表 3-2 中国分车型机动车保有量（2010 年）/10⁴ 辆

车辆类型	轻型车 ¹⁾		出租车 ²⁾		中型车 ¹⁾		重型车 ¹⁾		摩托车 ³⁾		农用车 ³⁾	总计
	汽油	柴油	汽油	天然气	汽油	柴油	柴油	天然气	汽油	柴油		
保有量	6130.8	541.3	47.6	75.0	124.8	291.1	505.7	5.6	10000.5	1284.0	19006.2	

1) 分燃料类型的轻型车和中型车，重型车保有量数据是在参考《中国机动车污染防治年报（2011）》^[19]、《中国统计年鉴（1997-2010）》^[20]、《中国汽车工业年鉴（2011）》^[21]等文献的基础上，结合中国 1996~2010 年的车辆销售量数据测算而得；

2) 出租车保有量数据主要参考于交通运输部发布的《1998-2011 年城市出租汽车数量统计表》^[22]；

3) 摩托车、农用车保有量数据主要来源于《中国机动车污染防治年报（2011）》^[19]。

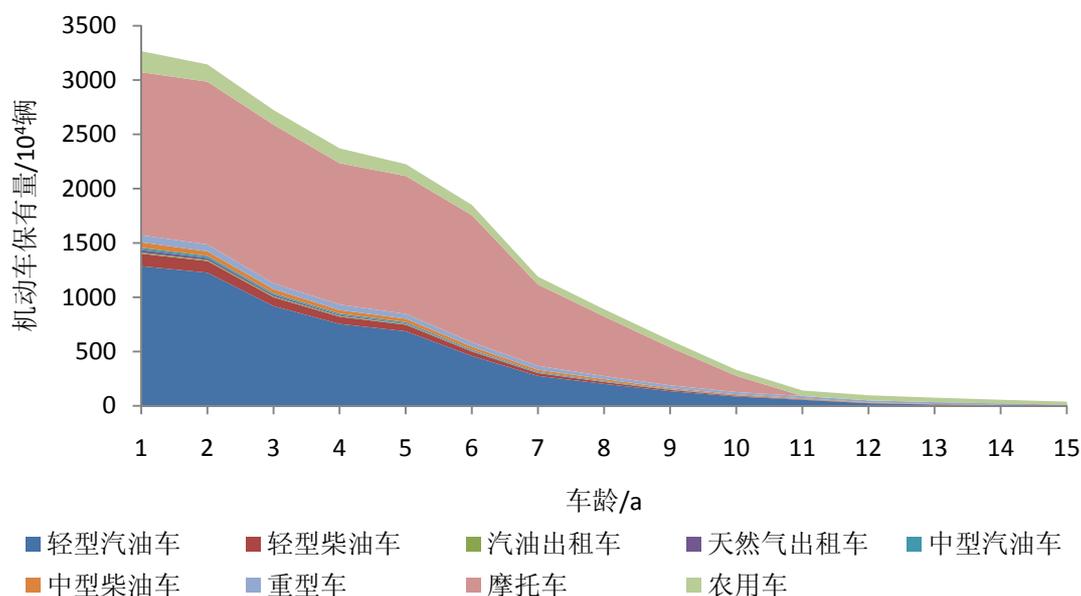


图 3-1 2010 年中国不同车型机动车分车龄保有量/10⁴ 辆

3.1.2.3 机动车年均行驶里程

年均行驶里程是计算各类机动车污染物排放量的重要参数。2010 年中国机动车分车型和分车龄的年均行驶里程，结果如图 3-2 所示。从表 3 中可以看出，

各车型机动车的年均行驶里程随车龄的增长多呈下降的趋势，表明机动车的使用频率随车龄的增加而减小。因车辆用途的差异，经广泛调研后将出租车的年均行驶里程取值为 $8 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$ km。

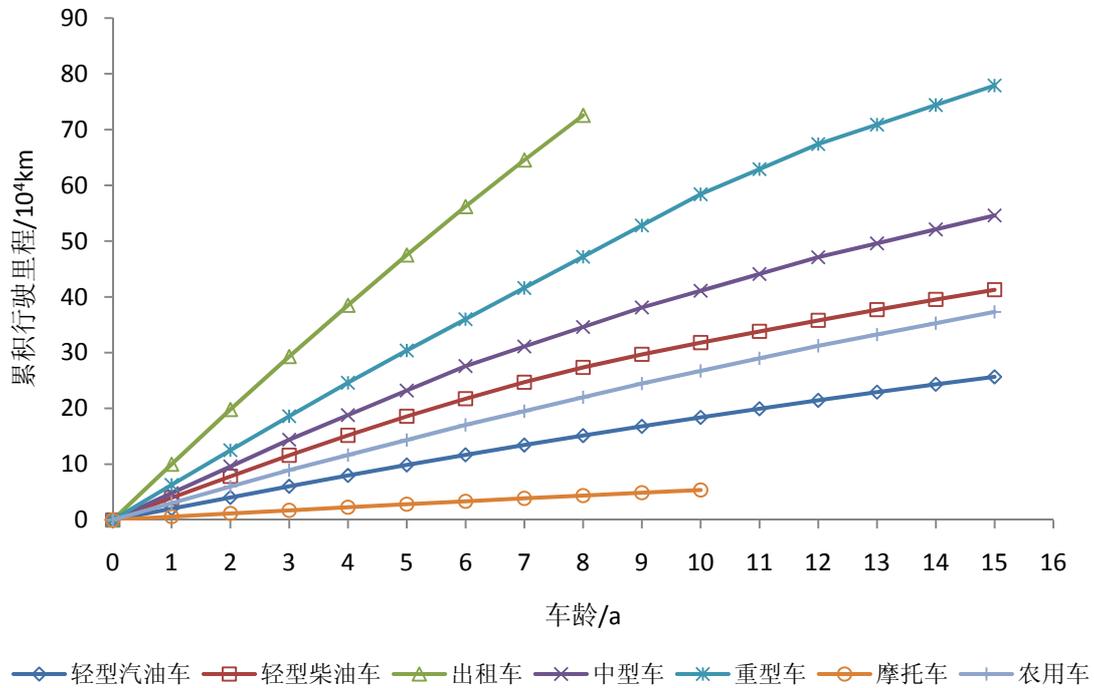


图 3-2 中国分车型机动车累积行驶里程 (2010 年)

3.1.2.4 CH₄ 和 N₂O 排放因子

机动车排放因子是对机动车尾气排放进行量化分析的重要指标，反映了机动车的单车排放水平，是进行控制对策研究的基础和依据。自 2000 年以来，中国环保部门主要参照欧盟机动车排放标准，颁布了一系列针对中国各车型的污染物排放标准。其中，轻型车的国 I 至国 IV 排放标准执行时间分别为 2000 年、2005 年、2008 年和 2011 年，重型柴油车和天然气车的国 I 至国 IV 标准执行时间分别为 2001 年、2004 年、2008 年和 2013 年，摩托车的国 I 至国 III 标准执行时间分别为 2003 年、2005 年和 2010 年，农用车的国 I 和国 II 标准执行时间分别为 2007 年和 2008 年。与此同时，中国也制定了相应的车用油品标准，但是汽、柴油质量标准的实施严重滞后于排放标准的要求，使得催化剂对尾气污染物的转化效率

下降，从而导致 CH₄ 和 N₂O 排放因子升高。2010 年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放因子如表 3-3、3-4 所示。

中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放因子共分为 a, b, c, d 四类，且可信度依次降低。其中 a, b, c 三类排放因子是依据本研究测试数据及相应的参考文献并考虑到中国机动车排放控制的发展进程和车用油品质量的实际状况来确定的，而 d 类排放因子是根据前三类排放因子推测得到。从表 3-3 中可见，中国各类机动车 CH₄ 排放因子随排放控制标准的加严和尾气后处理技术的不断升级完善而下降。由于 CH₄ 是最稳定的烃类化合物，比较难以发生氧化反应，导致尾气催化器的净化效率较低^[39]，因此天然气车的 CH₄ 单车排放会远高于汽油车和柴油车^[4-5]。轻型车与重型车 CH₄ 排放因子与 COPERT 模型和 IVE 模型的计算结果基本吻合，但是摩托车排放因子更接近于 COPERT 模型^[40-41]。中国各类机动车 N₂O 排放因子随排放控制标准的加严而呈现先升高再降低的趋势（见表 3-5）。这是由于 N₂O 排放量可能会因为 TWC 技术在机动车上的广泛使用而有所升高^[42]，但是随着技术的不断改进其排放将会逐步降低。中国的重型车自国 IV 排放阶段起才开始引入 SCR 控制技术，由于发动机的改善，从国 I 到国 III 排放阶段 N₂O 排放因子呈现为下降的趋势。此外，中国的排放控制技术和车用油品质量等相对某些发达国家较为滞后，所以存在相应车型的 N₂O 排放因子高于国外有关学者研究结果^[9-10] 的现象。

表 3-3 2010 年中国机动车 CH₄ 排放因子

车辆类型	燃料类型	不同排放控制水平下的排放因子/ (g/km)					其他参考依据
		国 I 前	国 I	国 II	国 III	国 IV	
轻型车	汽油	0.25 ^a	0.10 ^b	0.10 ^b	0.08 ^b	0.05 ^c	[4] [7] [40] [41]
	柴油	0.04 ^a	0.02 ^a	0.01 ^a	0.01 ^a	0.00 ^b	[4] [41]
出租车	汽油	0.25 ^a	0.10 ^b	0.10 ^b	0.08 ^b	0.05 ^c	[4] [7] [40] [41]
	天然气	2.50 ^b	1.15 ^b	0.95 ^b	0.75 ^a	0.45 ^a	[4] [7] [39]
中型车	汽油	0.60 ^d	0.30 ^c	0.20 ^c	0.16 ^d	0.10 ^d	[40]
	柴油	0.13 ^d	0.12 ^c	0.10 ^c	0.05 ^d	0.00 ^d	[40]

重型车	柴油	0.20 ^b	0.18 ^b	0.15 ^c	0.10 ^a		[4] [5] [6] [7] [40] [41]
	天然气	8.10 ^d	5.67 ^c	4.05 ^b	3.6 ^c	2.2 ^c	[5] [6] [41]
摩托车	汽油	0.2 ^c	0.1 ^c	0.08 ^c	0.04 ^c		[41]
农用车	柴油	0.04 ^d	0.02 ^d	0.01 ^d			

a, b, c, d 表示数据的可信度, 并且依次降低。其中除测试数据外, a: 数据参考依据为本研究或 3 篇以上的文献; b: 数据参考依据为本研究或不少于 2 篇文献; c: 数据参考依据为本研究或不少于 1 篇文献; d: 根据现有数据的推测值。

表 3-4 中国机动车 N₂O 排放因子 (2010 年)

车辆类型	燃料类型	不同排放控制水平下的排放因子/ (g/km)					其他参考依据
		国 I 前	国 I	国 II	国 III	国 IV	
轻型车	汽油	0.02 ^a	0.10 ^b	0.06 ^a	0.04 ^a	0.02 ^c	[4] [8] [9] [11] [41] [43]
	柴油	0 ^a	0.002 ^a	0.008 ^a	0.020 ^c	0.010 ^c	[4] [11] [41] [43]
出租车	汽油	0.02 ^a	0.10 ^b	0.06 ^a	0.04 ^a	0.02 ^c	[4] [8] [9] [11] [41] [43]
	天然气	0 ^c	0.060 ^b	0.040 ^c	0.010 ^c	0.008 ^d	[4] [40] [43]
中型车	汽油	0.04 ^d	0.15 ^d	0.1 ^b	0.06 ^c	0.03 ^d	[40]
	柴油	0.002 ^d	0.004 ^d	0.016 ^d	0.030 ^c	0.015 ^d	[40]
重型车	柴油	0.025 ^a	0.020 ^c	0.020 ^b	0.010 ^c		[6] [45] [40] [41] [43]
	天然气	-	0.19 ^d	0.13 ^d	0.06 ^b	0.03 ^c	[4] [5] [6]
摩托车	汽油	0.005 ^c	0.005 ^c	0.005 ^c	0.020 ^c		[41]
农用车	柴油	0 ^d	0.002 ^d	0.004 ^d			

a, b, c, d 表示数据的可信度, 且依次降低。除测试数据外, a: 数据参考依据为本研究或 3 篇以上的文献; b: 数据参考依据为本研究或不少于 2 篇文献; c: 数据参考依据为本研究或不少于 1 篇文献; d: 根据现有数据的推测值。

3.1.3 CH₄ 和 N₂O 排放清单

机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单可由式 (1) 计算得到, 清单结果列于表 3-5。2010 年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放总量分别为 25.13×10⁴ t 和 6.02×10⁴ t, 折合成 CO₂ 分别为 527.80×10⁴ t 和 1866.23×10⁴ t, 二者共计 2394.03×10⁴ t CO₂ 当量,

相当于 2007 年中国机动车 CO₂ 排放总量^[44-45]的 6.36%。其中，占机动车保有量约 40% 的汽车 CH₄ 和 N₂O 排放分担率最大，分别约为 79.07% 和 94.23%。虽然摩托车保有量在机动车中比例最大，但其 CH₄ 和 N₂O 排放量分别为 4.61 t 和 0.28 t，远低于汽车，这是因为摩托车的单车排放因子相对较低。在三类机动车中，农用车保有量相对较小，其排放分担率也最小。

表 3-5 中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单 (2010 年)

污染物	轻型车		出租车		中型车		重型车		汽车总计	摩托车	农用车
	汽油	柴油	汽油	天然气	汽油	柴油	柴油	天然气			
CH ₄											
排放量/10 ⁴ t	8.94	0.15	0.33	4.37	0.87	0.63	3.31	1.27	19.87	4.61	0.65
分担率/%	45.01	0.77	1.65	21.97	4.37	3.19	16.67	6.37	100		
N ₂ O											
排放量/10 ⁴ t	4.14	0.29	0.14	0.09	0.33	0.28	0.39	0.02	5.67	0.28	0.07
分担率/%	72.93	5.09	2.54	1.57	5.85	4.87	6.86	0.29	100		

2010 年中国汽车 CH₄ 和 N₂O 排放总量分别为 19.87×10⁴ t 和 5.67×10⁴ t。在各类汽车中，对 CH₄ 排放分担率最大的是轻型汽油车，其分担率为汽车总排放的 45.01%，原因是保有量大，但是不足汽车保有量 1% 的天然气出租车 CH₄ 排放分担率也高达 21.97%，是因为该类车单车排放高。对于 N₂O 而言，汽车中排放分担率最高的车型依然是轻型汽油车，达到 72.93%，这主要是轻型汽油车广泛使用 TWC 所致；其次是重型柴油车，排放分担率为 6.86%。因此，轻型汽油车和天然气出租车应作为机动车 CH₄ 减排的重点车型，而天然气车单车减排的效果将更加显著；对于机动车 N₂O 的减排，应该首选轻型汽油车。

3.1.4 排放清单估算的不确定性分析

机动车排放清单估算过程中的不确定性主要来源于：(1) 机动车活动水平数据的选取：机动车活动水平数据来自于文献和实地调研，在估算年均行驶里程时，可能存在 10% 左右的误差，由此会导致清单结果产生不确定性；(2) 排放因子的选取：a. 在机动车保有量大的较发达地区，如北京、上海、广州和深圳等城市，

机动车排放标准实施时间要早于其他地区，但是其保有量不足全国的 10%，且排放标准施行仅比国内其他地区早 2~3a，为了简化计算，确定排放因子时选用全国统一的排放控制阶段，这可能会导致排放清单的测算结果有 2%的高估；b.因缺乏中国机动车 CH₄ 和 N₂O 排放因子的实测数据，文中排放因子的选取主要来源于国外相关研究成果，尽管已经考虑了国内外在机动车排放控制阶段和车用油品质量等方面的差异，但监管力度等其他影响因素的不同仍然会给研究结果带来较大的不确定性。由于目前开展机动车排放监管力度等的研究较为困难，所以其对机动车 CH₄ 和 N₂O 排放的影响还需将来进一步地分析探讨。

为了进一步对排放清单估算的不确定性进行量化分析，该研究首先选取实地调研样本量偏少且相关研究较少的中型车、摩托车和农用车，对其年均行驶里程进行了敏感性分析；其次根据数据可信度情况对各类型机动车的排放因子也开展了敏感性分析，随着 a、b、c、d 可信度的依次降低，敏感性分析中的 4 类排放因子变化幅度的取值依次增大。经测算，得出 2010 年中国机动车 CH₄ 排放量在 $18.21 \times 10^4 \sim 29.52 \times 10^4$ t 之间；N₂O 排放量在 $4.32 \times 10^4 \sim 7.62 \times 10^4$ t 之间。USEPA 测算的美国 2010 年机动车 CH₄ 和 N₂O 排放的不确定性变化区间分别是排放量的 90%-109%和 94%-126%^[46]。与之相比，该研究的测算结果不确定性较大，所以还有待于进一步对上述不确定性因素进行深入研究，提高清单的编制精度。

3.2 机动车 HFC-134a 排放清单

3.2.1 机动车空调制冷剂 HFC-134a 实地调研

HFCs 是氢氟碳化物的简称，是《京都议定书》下控制的六类温室气体之一。在我国，HFC-134a 是当前使用量最大的 HFCs 类气体，被广泛应用于汽车空调中。为了履行《蒙特利尔议定书》，我国从 1996 年开始逐步削减 CFC-12 的生产。《中国逐步淘汰消耗臭氧层物质国家方案》明确规定，自 2002 年 1 月 1 日起，新生产的汽车禁止使用 CFC-12 作为空调制冷剂，一律改用 HFC-134a 替代。HFC-134a 制冷能力较小，但传热性能优异，毒性低，HFC-134a 的臭氧消耗潜值（ODP）为零，但其具有较高的 GWP 值，因此在发达国家已经被要求控制排放。

随着我国汽车保有量的迅速增长，HFC-134a 的使用量及排放量明显增加，若不及时进行控制与限制，未来几十年内必将会对我国环境造成影响。因此，分析和预测中国汽车空调 HFC-134a 的需求量和排放量，对于应对国际社会加快淘汰 HFC-134a 的行动，以及对中国更好地控制温室气体排放乃至制订替代方案都具有十分重要的意义。

针对 HFCs 在中国汽车空调行业的重要作用，我们进行了实地考察和调研。通过在北京、山东等大城市进行汽车空调制冷剂 HFC-134a 的调研工作，获得了汽车制冷剂状况评价，制冷剂种类，HFC-134a 空调车比例，更换原因以及更换地点等信息，共调研了 191 辆机动车，包括小轿车，货车，大中型客车等。调查统计信息如表 6 所示：

表 3-6 汽车调研信息汇总表

调查车辆分类		轿车	货车	大中型客车	总计
调查车总量		73	41	77	191
HFC-134a	数量/辆	72	16	67	155
	空调车	98.63	39.02	87.01	81.15
维修添加过制冷剂车量		10	12	49	71

注：在重型货车中，国 I、国 II 排放阶段都未安装空调设备，国 III、国 IV 排放阶段基本安装空调设备

调查结果显示，HFC-134a 空调轿车、大中型客车及货车占总量的比分别 98.63%、39.02%和 87.01%，但考虑到本次调研样本量较少，而调研对象大多为大城市，并不能客观的反应全国空调汽车的比例，有待进一步开展调研工作以提高数据的准确性。



图 3-3 汽车空调制冷剂 HFC-134a 调查样表

3.2.2 研究方法及参数确定

3.2.2.1 空调汽车生产量和保有量

由于摩托车和农用车未安装空调系统，因此建立 HFC-134a 排放清单时只需测算汽车空调制冷剂的排放量。根据汽车内室空间的大小（HFC-134a 制冷剂的灌装量多少），测算排放清单时将汽车分为中大型客车，轿车，货车三类，并将所有车辆的平均使用寿命定为 15 年。根据中国机动车污染防治年报（2011）^[19]、中国统计年鉴（2011）^[20]、中国汽车工业年鉴（2011）^[21]等的相关统计数据，获得我国 2002 年~2011 年各类汽车的生产量和保有量数据。

由于本次研究调查的数据量有限，在确定各类汽车中空调车的比例时，结合北京大学的调查结果^[47]，将我国轿车、中大型客车和货车中空调车比例分别确定为 100%、75%和 30%。根据 IPCC 建议中的参考值^[48]和实地调查，确定轿车、大中型客车和货车的初始灌装量分别为 0.8、4.0、0.8 kg/辆；由于汽车注册统计数字中不能提供报废率，本文选用 8%的缺省值。

表 3-7 中国空调汽车生产量、保有量及制冷剂 HFC-134a 初始充灌量（2010 年）/10⁴ 辆

项目	轿车		中大型客车		货车	
	生产量	保有量	生产量	保有量	生产量	保有量
汽车总量	1232.2	5861.6	22.5	262.5	263.8	1597.6

空调车所占比例	100%	100%	75%	75%	30%	30%
空调车量	1232.2	5861.6	16.9	196.9	79.1	479.3
初始充灌量/(kg/辆)	0.8		4		0.8	

3.2.2.2 汽车 HFC-134a 排放清单测算方法

IPCC 优良作法^[48]给出了两种计算 HFC-134a 的方法，即自上而下和自下而上的方法。自上而下法计算结果较为准确，此方法需要提供的数据少，但要求准确可靠，往往需要得到汽车行业及制冷行业内部提供的数据。而自下而上法刚好相反，它需要确定的参数较多，但可以通过实地考察和文献调研获得。由于汽车行业及制冷剂行业内部数据很难得到，故本研究选用自下而上的方法计算 HFC-134a 的排放：

$$\text{HFC-134a 年排放量} = \text{初次充填排放} + \text{运行排放} + \text{清理排放} - \text{人为消除量} \quad (4)$$

式中：初次充填排放是指新生产车辆在首次加注制冷剂时排放的 HFC-134a 量；运行排放包括不论产地的所有在役汽车空调运行过程中的排放，包括泄漏、维修和事故排放；清理排放包括汽车报废情况下，由于未采用回收等方式，设备内的剩余的制冷剂释放量；人为消除量则是通过物理或者化学方法破坏 HFCs 分子结构的消除量。

(1) 初次充填排放

需要估算全国汽车空调设备的数量、每辆车 HFC-134a 的初始充填量和充填泄漏率，计算公式如下：

$$\text{第 } n \text{ 年：初次充填排放量} = \text{HFC-134a 初次充填总量} \times \text{充填泄漏率} \quad (5)$$

式中 HFC-134a 初次充填总量为汽车空调设备的数量与每辆车 HFC-134a 的初始充填量的乘积。

(2) 运行排放

运行排放主要是在设备运行工作期间的泄漏，包括维修排放。计算公式如下：

$$\text{第 } n \text{ 年：运行排放} = \text{当年 HFC-134a 存量} \times \text{运行排放率} \quad (6)$$

式中：HFC-134a 存量应该包括所有在役空调系统的使用量。

(3) 清理排放

也称报废排放，指的是空调设备在报废过程中的排放。计算清理排放量需要了解汽车的平均使用寿命 y 年以及 y 年前的初次充填量。初始充灌残留率是设备清理时的残留量与初次充填量的百分比，回收率与制冷剂清理过程中是否有回收相关，若采用回收循环使用，则总量中应该减去这部分的比例。如果没有循环利用，则回收率等于 0%。计算公式如下：

$$\text{第 } n \text{ 年：清理排放} = \text{第 } n-y \text{ 年的 HFC-134a 充填量} \times \text{初始充灌残留率} \times (1 - \text{回收率}) \quad (7)$$

上述充填泄漏率、运行排放率、初始充灌残留率和清理排放回收率通过文献调研^[47-48]获得，如表 3-8 所示。

表 3-8 汽车空调排放计算缺省值（自下而上）

自下而上排放参数	IPCC 缺省更新值	本报告使用值
充填泄漏率	0.5%	0.5%
运行排放率	10-20%	16%
初始充灌残留率	40%	50%
回收率	0%	0

实地调查结果显示：在车辆正常运行情况下，目前我国汽车空调制冷剂更换的时间间隔在 5 年~8 年之间，为简化计算，将 HFC-134a 制冷剂的更换时间确定为 6 年。考虑到车辆在更换制冷剂时空调设备中依然会存留少量 HFC-134a，结合 IPCC 缺省更新值，故将年运行排放率取值为 16%。根据车辆平均寿命和年运行排放率，将初始充灌残留率取值为 50%。由于初始充填排放率通过调研很难查到，本研究沿用 IPCC 缺省更新值。考虑到我国实际情况，到目前为止，由于回收成本较高，难度较大。我国还未实行对报废车辆中残留的 HFC-134a 进行回收，故回收效率为 0%。

3.2.3 HFC-134a 排放清单

利用 2010 年空调汽车生产量、保有量及相关参数，根据式（4）测算得到 2010 年机动车 HFC-134a 排放清单，列于表 9。2010 年中国汽车空调 HFC-134a 排放量约为 $1.18 \times 10^4 \text{ t}$ ，相当于 $1530.92 \times 10^4 \text{ t CO}_2$ 当量。通过不同类型的车进行对比发现，轿车虽然在初始灌装量上小于大中型客车，但是由于其保有量很大，致使排放量最高，约为排放总量的 80.06%；从排放阶段来看，运行排放高达 79.62%，其次是清理排放量，约占总量的 19.91%。清理排放是因为我国目前并没有回收制冷剂的要求，导致报废清理时残留的制冷剂全部排放。初次充填排放由于排放系数较小，其排放比例较小。

表 3-9 空调汽车 HFC-134a 排放清单（2010 年）/ 10^4 t

车辆类型	初次充填排放	运行排放	清理排放	总计
轿车	4.93×10^{-3}	0.75	0.19	0.94
客车	3.37×10^{-4}	0.13	0.03	0.16
货车	3.17×10^{-4}	0.06	0.02	0.08
总计	5.58×10^{-3}	0.94	0.23	1.18

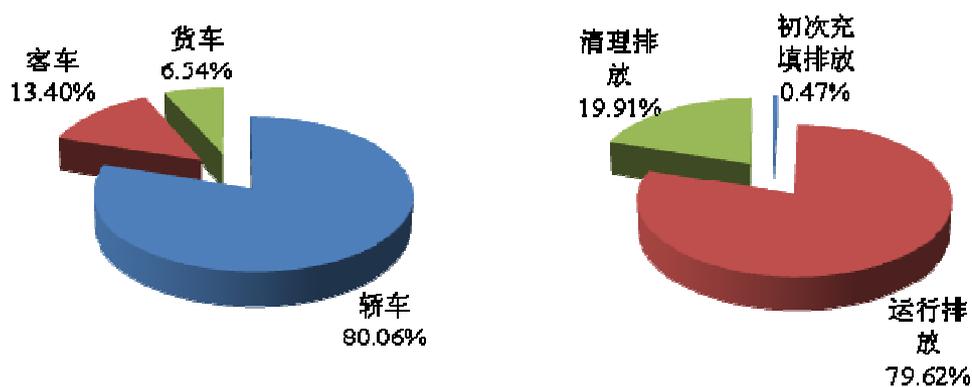


图 3-4 不同车辆类型及排放阶段 HFC-134a 排放分担率

3.2.4 汽车空调制冷剂 HFC-134a 排放不确定性分析

本研究利用实地走访调查和文献调研获得数据对 IPCC 优良做法的相关参数进行了更新，测算得到 2010 年汽车空调制冷剂 HFC-134a 排放清单。由于我国汽车保有量大、种类多，且调研数据十分有限，因此清单的不确定性主要来自于排放参数的选择。不确定性分析显示：2010 年中国机动车 HFC-134a 排放量在 $0.88 \times 10^4 \text{t} \sim 1.47 \times 10^4 \text{t}$ 之间。鉴于此，未来有待于进一步加强实地调研工作，并尽可能多的获得相关行业准确数据，以提高 HFC-134a 排放清单的精度。

3.3 非 CO₂ 温室气体排放清单及与其他研究结果的比较分析

2010 年中国机动车 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 排放总量分别为 $25.13 \times 10^4 \text{t}$ 、 $6.02 \times 10^4 \text{t}$ 和 $1.55 \times 10^4 \text{t}$ ，根据相应的 GWP，折合成 CO₂ 分别为 $527.80 \times 10^4 \text{t}$ 、 $1866.23 \times 10^4 \text{t}$ 和 $1530.92 \times 10^4 \text{t}$ CO₂ 当量，三者共计 $4412.51 \times 10^4 \text{t}$ CO₂ 当量。如图 3-5 所示，2010 年机动车非 CO₂ 类温室气体中，N₂O 和 HFC-134a 温室效应较为显著，排放分担率相对较高，分别为 47.55%；为 39.00%；CH₄ 虽然排放总量最大，但因其 GWP 值远低于 HFC-134a 和 N₂O，故在机动车非 CO₂ 类温室气体中排放分担率最小。

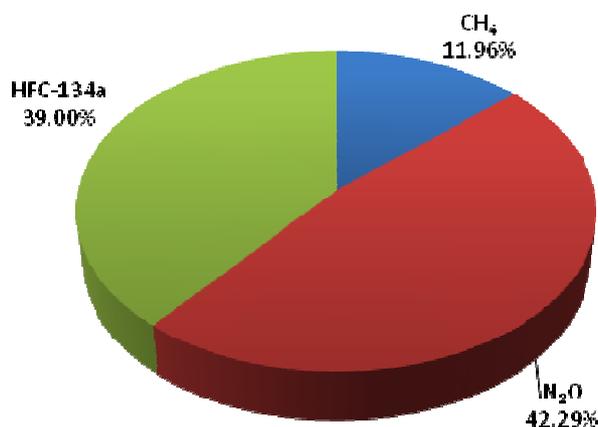


图 3-5 2010 年机动车非 CO₂ 类温室气体排放分担率（以 CO₂ 当量计）

将该研究得到的排放结果与国内外机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单进行了比较分析，姚志良等^[40]研究得到的 2007 年北京、上海和深圳 3 座城市 CH₄ 排放量分

别为该研究计算的全国总排放结果的 6.66%、4.00%和 2.27%，N₂O 排放量分别为 1.97%、1.49%和 0.66%。在 3 座城市中 CH₄ 和 N₂O 排放分担率最大的均为轻型客车，这一结论与该研究相同。比较分析中美两国各车型 CH₄ 和 N₂O 排放清单（见图 3-6）可以得出：中、美两国机动车 CH₄ 排放分担率最高的车型均为轻型汽油车，但是由于美国轻型汽油车在机动车保有量中所占比例远大于中国，所以相比之下其排放分担率更高；相反中国天然气车和摩托车保有量远远大于美国，所以二者排放分担率相对较高；对于中重型柴油车而言，由于中国排放控制的水平比美国要滞后很多，因此其排放分担率要明显高于美国。对于 N₂O 而言，轻型汽油车排放分担率在中、美两国机动车排放中依然占据主导地位，分别为 71.27% 和 90.06%。对比其他车型排放分担率差异较大的是摩托车，这是因为中国摩托车占机动车保有量的比例高达 53%，而美国却不足 5%。北京大学研究得出 2010 年中国汽车空调制冷剂 HFC-134a 排放量为 1.64×10⁴t，是本研究结果的 1.39 倍。这主要是由于排放参数（运行排放率和初始充灌残留率）的更新所致。

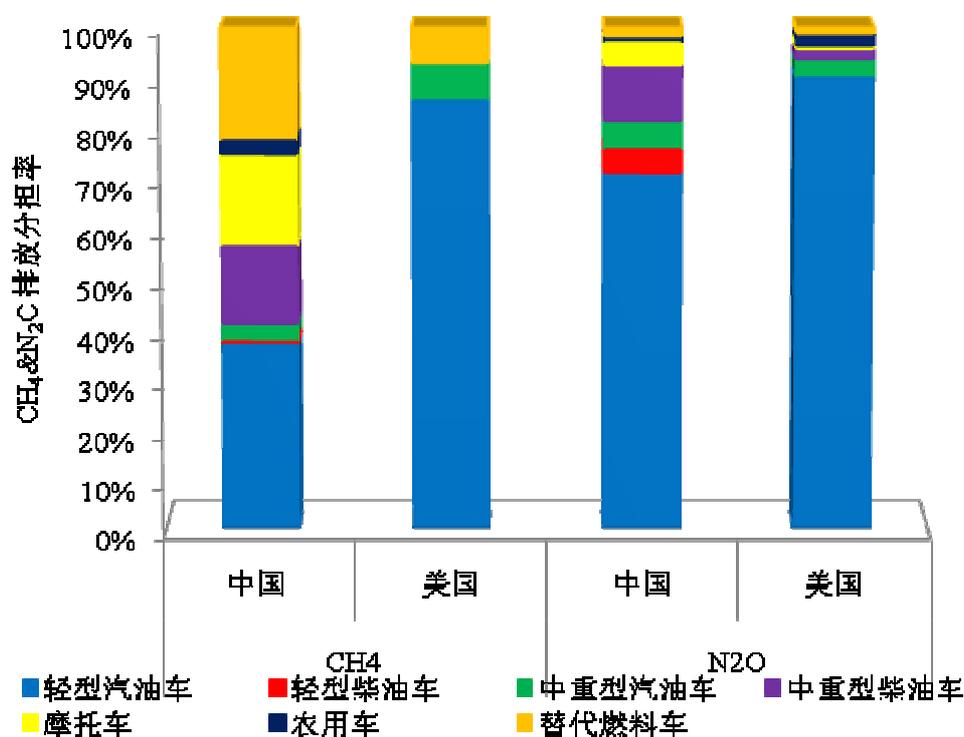


图 3-6 2010 年中美机动车 CH₄ 和 N₂O 排放分担率

注：替代燃料车在中国清单中是指天然气车，而美国清单中则是指以天然气、LPG 为

主的替代燃料车；农用车在美国清单中除表 3-1 表述的车型外，还包括农用非道路机械。

将 2010 年中国机动车非 CO₂ 类温室气体排放与 CO₂ 及具有温室效应的 BC 排放量相比较可知：中国机动车温室效应污染物排放中，CO₂ 和 BC 排放分担率分别为 84.33%和 10.75%，而非 CO₂ 类温室气体 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 排放分担率共计为 4.92%，由此可知 CO₂ 和 BC 仍是机动车温室气体的重点。

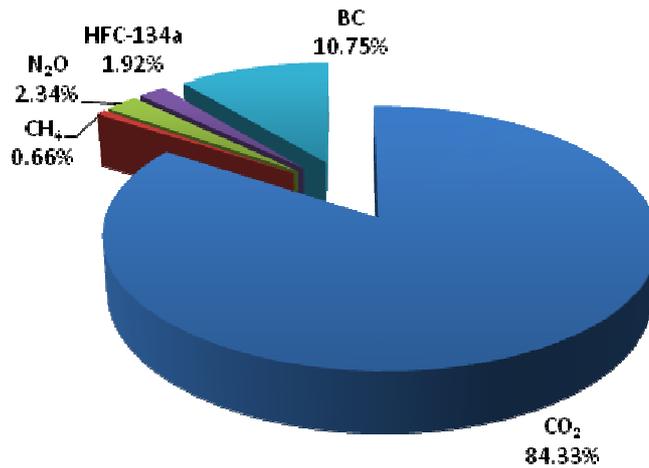


图 3-7 机动车温室气体排放分担率

注：机动车 CO₂ 排放总量是在本研究过程中测算得到，机动车 BC 排放总量数据源于清华大学贺克斌等的研究成果。

3.4 小结

本研究根据有关统计年鉴、年报以及政府发布的信息数据，利用实地调查和相关文献资料获得相应的年均行驶里程；通过实车测试和文献调研，并综合考虑中国机动车排放控制的发展进程以及车用油品的实际状况等因素对排放的影响，确定分车型、燃料和不同控制阶段的 CH₄ 和 N₂O 排放因子。基于上述分析结果，建立全国层面的机动车 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 排放清单。

(1) 中国 2010 年机动车分车型 CH₄ 和 N₂O 排放清单，并对测算数据进行了不确定性分析得出：2010 年中国机动车 CH₄ 和 N₂O 的排放总量分别为 $25.13 \times 10^4 \text{ t}$ ($18.21 \times 10^4 \sim 29.52 \times 10^4 \text{ t}$) 和 $6.02 \times 10^4 \text{ t}$ ($4.32 \times 10^4 \sim 7.62 \times 10^4 \text{ t}$)。其中，CH₄ 和 N₂O 排放分担率最大的是汽车，分别约为 79.07%和 94.23%，摩托车

和农用车排放量远低于汽车。

(2)2010年中国汽车 CH₄ 和 N₂O 排放总量分别为 19.87×10^4 t 和 5.67×10^4 t。在各类汽车中，CH₄ 排放主要来源于轻型汽油和天然气出租车，排放分担率分别为 45.01%和 21.97%；N₂O 主要来源于轻型汽油车，其排放分担率占汽车总排放量的 72.93%。

(3) 轻型汽油车是中国 CH₄ 和 N₂O 排放分担率最大的一类机动车，进一步提高它的排放控制水平，是削减 CH₄ 和 N₂O 的有效途径。对于 CH₄，单车排放高的天然气出租车的减排与监管也尤为重要。此外，进一步提高油品的质量也是降低机动车 CH₄ 和 N₂O 两种温室气体排放的有效措施。

基于实地走访调研，并结合北京大学胡建信等的研究结果以及 IPCC 相关报告更新汽车空调制冷剂 HFC-134a 相关的参数值，建立机动车 HFC-134a 排放清单。通过测算，2010 年中国汽车空调 HFC-134a 排放量约为 1.18×10^4 t，即 1530.92×10^4 t CO₂ 当量。通过不同车型进行对比发现，轿车的排放量最高，排放分担率为 80.06%，这主要是其保有量最大导致的。而从排放阶段来看，运行排放高达 79.62%。不确定性分析显示：2010 年中国机动车 HFC-134a 排放量在 0.88×10^4 t~ 1.47×10^4 t 之间。

2010 年中国机动车非 CO₂ 类温室气体排放总量为 3924.95×10^4 t CO₂ 当量。其中，N₂O 和 HFC-134a 温室效应较为显著，排放分担率相对较高，分别为 47.55%；为 39.00%；CH₄ 虽然排放总量最大，但因其 GWP 值远低于 HFC-134a 和 N₂O，故在机动车非 CO₂ 类温室气体中排放分担率最小。

第 4 章 机动车非 CO₂ 类温室气体减排潜力分析

未来机动车非 CO₂ 类温室气体排放受到很多因素的影响，为了更加合理恰当当地分析预测机动车非 CO₂ 类温室气体排放量，本研究结合相关减排措施以及我国关于资源节约和节能减排要求，作出以下减排情景分析（见表 4-1）：

表 4-1 机动车非 CO₂ 类温室气体减排情景分析

情景	描述
基线情景	排放控制维持目前水平，机动车保有量增长维持目前速度，年均行驶里程每隔 5 年下调 10%
减排情景	
执行新标准	轻型车分别于 2011 年和 2016 年执行国 IV、国 V 标准；重型车执行分别于 2013 年和 2016 年执行国 IV、国 V 标准
替代燃料	方案 1：10+5 即 10% 轻型车汽油车采用天然气替代燃料，5% 重型车采用天然气替代燃料
	方案 2：20+10 即 20% 轻型车汽油车采用天然气替代燃料，10% 重型车采用天然气替代燃料
制冷剂回收	自 2020 年起，通过在报废环节引进回收设备，回收报废过程中 50% 的 HFC-134a
制冷剂替换	假定自 2016 年起，新车全部改为填充 HFO-1234yf，10 年~15 年内全部淘汰 HFC-134a，全部改为 HFO-1234yf 空调汽车

4.1 基线情景下机动车非 CO₂ 类温室气体排放预测

为考察各控制对策的削减潜力，将基线情景假定为不采取任何管理对策，排放控制维持目前水平，机动车保有量增长维持目前速度。针对不同的机动车类型，根据其增长特点，对每一类型的机动车分别进行回归分析预测，通过采用较为平缓的二元二次曲线对机动车保有量历史数据进行回归分析，预测 2015 年和 2020 年机动车保有量（见表 4-2）。由于机动车保有量的快速增长，交通压力亦会随

之加剧，致使各车型的年均行驶里程会逐渐下降。

表 4-2 基线情景下中国分车型机动车保有量预测/10⁴辆

年份	轻型车		出租车		中型车		重型车		摩托车	农用车	总计
	汽油	柴油	汽油	天然气	汽油	柴油	柴油	天然气	汽油	柴油	
2010	6130.8	541.3	47.6	75.0	124.8	291.1	505.7	5.6	10000.5	1284.0	19006.2
2015	11666.3	658.2	86.9	150.0	191.9	447.8	359.7	41.6	12500.0	1016.8	27119.1
2020	18191.6	798.6	140.0	229.3	227.3	530.4	412.7	60.0	10400.0	1016.8	32006.9

为了简化计算，将各车型年均行驶里程每隔 5 年下调 10%。将预测的保有量及行驶里程数据代入式(1)得到 2015 年和 2020 年各车型 CH₄ 和 N₂O 排放清单。从表 4-3 中可以看出，在基线情景下，CH₄ 排放总量从 2010 年到 2020 年增长 1.56 倍，N₂O 排放总量增长约 1.24 倍。由于基线情景下的排放维持 2010 年控制水平，2010 年后各车型的排放因子均采用其 2010 年时的排放因子，但年均行驶里程作出了相应的下调，因此排放总量的增长是保有量增大所致，其中重型天然汽车排放增长最为明显，这主要是因为其排放因子高于其他车型，且其保有量也在成倍上升。

表 4-3 基线情景下中国分车型机动车 CH₄ 和 N₂O 排放清单预测

污染物/年份	轻型车		出租车		中型车		重型车		摩托车	农用车	总计
	汽油	柴油	汽油	天然气	汽油	柴油	柴油	天然气	汽油	柴油	
CH ₄											
2010											
排放量/10 ⁴ t	8.94	0.15	0.33	4.37	0.87	0.63	3.31	1.27	4.61	0.65	25.13
分担率/%	35.59	0.61	1.30	17.37	3.46	2.52	13.18	5.04	18.34	2.59	100
2015											
排放量/10 ⁴ t	11.48	0.11	0.37	5.86	0.82	0.27	1.51	4.27	4.96	0.31	29.97
分担率/%	38.32	0.38	1.25	19.55	2.74	0.90	5.04	14.25	16.55	1.03	100

2020											
排放量/10 ⁴ t	13.88	0.11	0.54	8.00	0.80	0.16	1.18	10.71	3.71	0.22	39.31
分担率/%	35.31	0.27	1.37	20.35	2.03	0.40	3.00	27.25	9.45	0.57	100
N ₂ O											
2010											
排放量/10 ⁴ t	4.14	0.29	0.14	0.09	0.33	0.28	0.39	0.02	0.28	0.07	6.02
分担率/%	68.73	4.79	2.40	1.48	5.51	4.59	6.46	0.27	4.59	1.18	100
2015											
排放量/10 ⁴ t	4.89	0.28	0.15	0.13	0.26	0.36	0.21	0.04	0.31	0.08	6.71
分担率/%	72.87	4.17	2.23	1.92	3.94	5.43	3.06	0.57	4.62	1.19	100
2020											
排放量/10 ⁴ t	5.57	0.30	0.21	0.18	0.24	0.37	0.19	0.10	0.23	0.08	7.47
分担率/%	74.55	3.99	2.87	2.38	3.21	4.98	2.50	1.28	3.11	1.14	100

考虑到依据目前我国发展趋势，中国汽车行业并未出台减排 HFC-134a 的相关规定。故将不淘汰 HFC-134a 的情景作为基线情景。基线情景下，2015 年中国空调汽车 HFC-134a 排放量约为 2.15×10^4 t，相当于 2789.90×10^4 t CO₂ 当量；2020 年 HFC-134a 排放量约为 3.23×10^4 t，相当于 4195.41×10^4 t CO₂ 当量。

表 4-4 基线情景下 HFC-134a 排放量

年份	汽车类型	HFC-134a 空调汽车/10 ⁴ 辆		HFC-134a 排放/10 ⁴ t			
		生产量	保有量	初次填充	运行	清理	总计
2015	轿车	1582.5	11903.2	6.33×10^{-3}	1.52	0.38	1.91
	客车	21.6	207.8	4.31×10^{-4}	0.13	0.03	0.17
	货车	69.5	426.6	2.78×10^{-4}	0.05	0.01	0.07
	总计	1673.5	12537.6	7.04×10^{-3}	1.71	0.43	2.15
2020	轿车	2467.3	18561.0	9.87×10^{-3}	2.38	0.59	2.98
	客车	30.2	202.8	6.04×10^{-4}	0.13	0.03	0.16

货车	83.2	527.6	3.33×10^{-4}	0.07	0.02	0.08
总计	2580.7	19291.4	1.08×10^{-2}	2.57	0.64	3.23

基于上述研究得到：基线情景下，随着机动车保有量的快速增长，3种机动车非CO₂类温室气体排放逐渐增大，HFC-134a排放增加尤为显著，2015年和2020年HFC-134a排放总量分别是2010年的1.82倍和2.74倍。

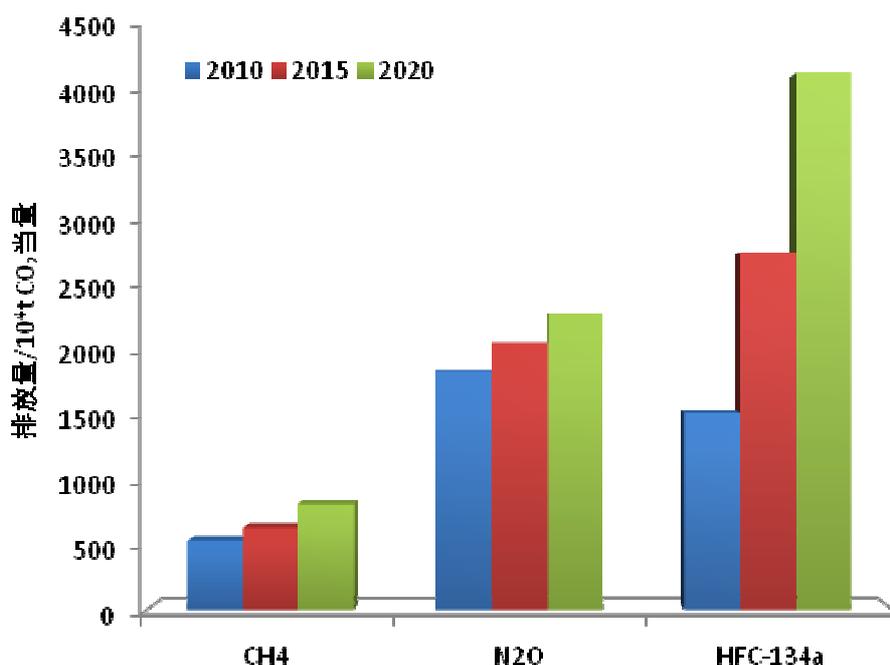


图 4-1 基线情景下 2010 年、2015 年和 2020 年机动车非 CO₂ 类温室气体
排放总量/10⁴t CO₂ 当量

4.2 减排情景下机动车非 CO₂ 类温室气体排放预测

制定更加严格的机动车排放标准或法规：新标准限值的执行，将进一步促进发动机和尾气后处理技术等会进一步升级完善，同时加强车主对车辆维护保养，对降低机动车排气污染，改善环境空气质量起到积极的促进作用。标准限值的加严，主要是为了控制机动车常规污染物（CO、NO_x 和 HC 等）的排放，但是执行更加严格排放标准要通过改善发动机燃料系统、改进尾气后处理技术以及提高油品质量等才能得以实现，所以执行国IV标准（轻型车 2011 年、重型车 2013

年)和国V标准(轻型车2016年、重型车2016年)的附加效应就能够促使机动车尾气CH₄和N₂O减排。

从图4-2和4-3可看出,执行新标准限值对机动车尾气CH₄和N₂O减排具有显著的效果。随着排放标准的加严,2015年和2020年CH₄排放量相对于其各自的基线情景分别减少37.66%和51.67%;N₂O排放量分别减少16.11%和50.39%(见表4-5)。

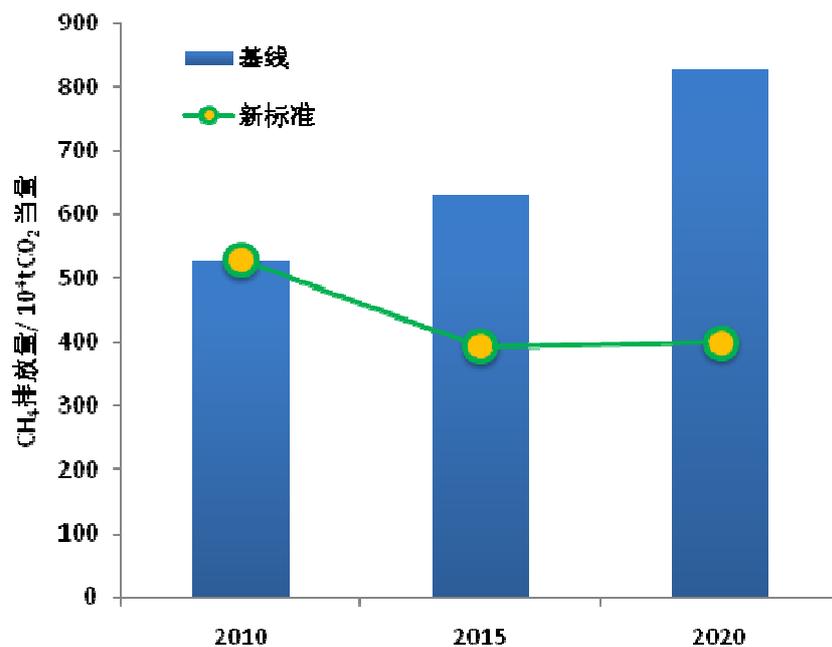


图4-2 基线情景与执行新标准情景下的CH₄排放量比较

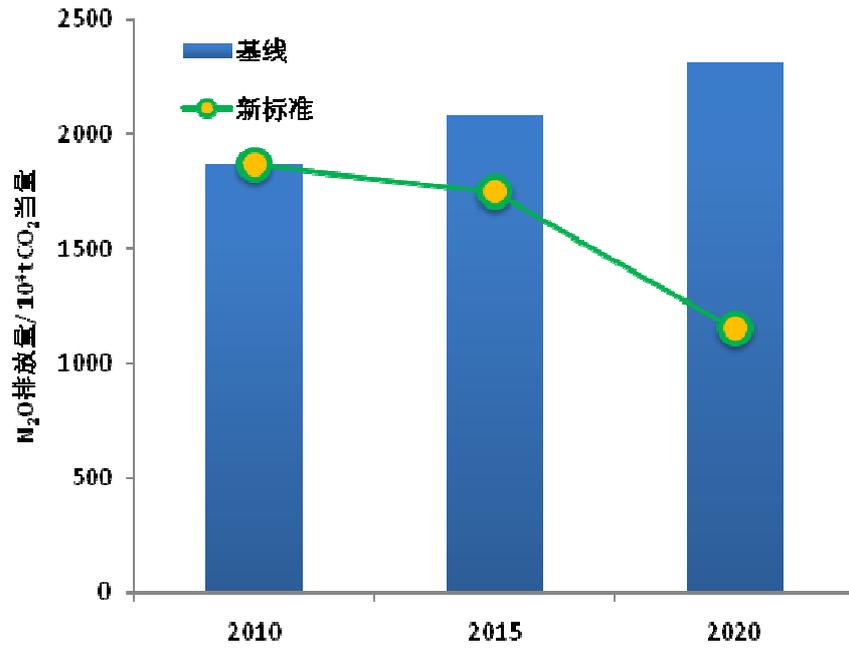


图 4-3 基线情景与执行新标准情景下的 N₂O 排放量比较

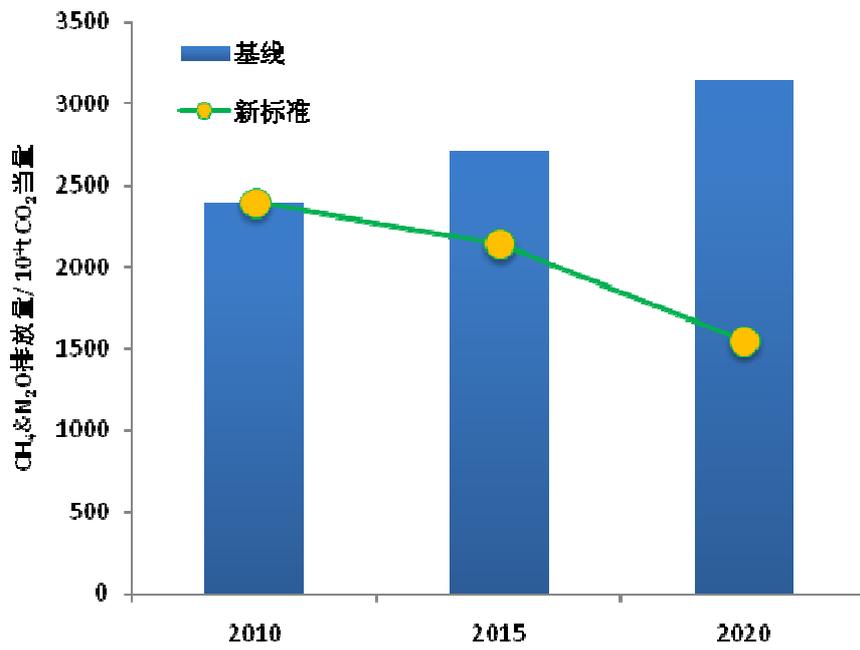


图 4-3 基线情景与执行新标准情景下的 CH₄ 和 N₂O 排放总量比较

表 4-5 排放标准加严的减排效果

年份	减排比例/%		
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄ &N ₂ O
2010	0.00	0.00	0.00
2015	-37.66	-16.11	-21.11
2020	-51.67	-50.39	-50.73

替代燃料的应用：传统能源供应趋紧、温室气体减排压力不断增大，发展替代能源已成为普遍共识。我国确立了“以可再生能源替代化石能源，以新能源替代传统能源、以优势能源替代稀缺能源”的替代能源发展总体战略。鼓励推广应用天然气汽车。1999 年启动的“空气净化工程清洁汽车行动”和 2006 年启动的“节能与新能源汽车”高科技计划中都支持研发和推广使用天然气汽车。2007 年 8 月，国家发展和改革委员会颁布的《天然气利用政策》规定，天然气汽车（尤其是双燃料汽车）是优先类天然气利用方式。

本研究选择天然气作为替代燃料，包括 CNG（压缩天然气）和 LNG（液化天然气），其中 CNG 主要用于轻型车和部分公交车，LNG 则应用于重型货车。从图 4-4、4-5、4-6 和 4-7 及表 4-6 中可知：天然气替代燃料的使用致使 CH₄ 排放显著增加，2015 年和 2020 年方案 1（10+5）均增加 40%左右，方案 2（20+10）排放增加 75%以上，但是 N₂O 有 3%~8%的下降，CO₂ 有 4%~6%的下降。虽然其致使机动车 CH₄ 排放总量增加，但对于机动车温室气体（CO₂、CH₄ 和 N₂O）排放的总体减排效应仍较为明显，减排比例约为 4%~5%。

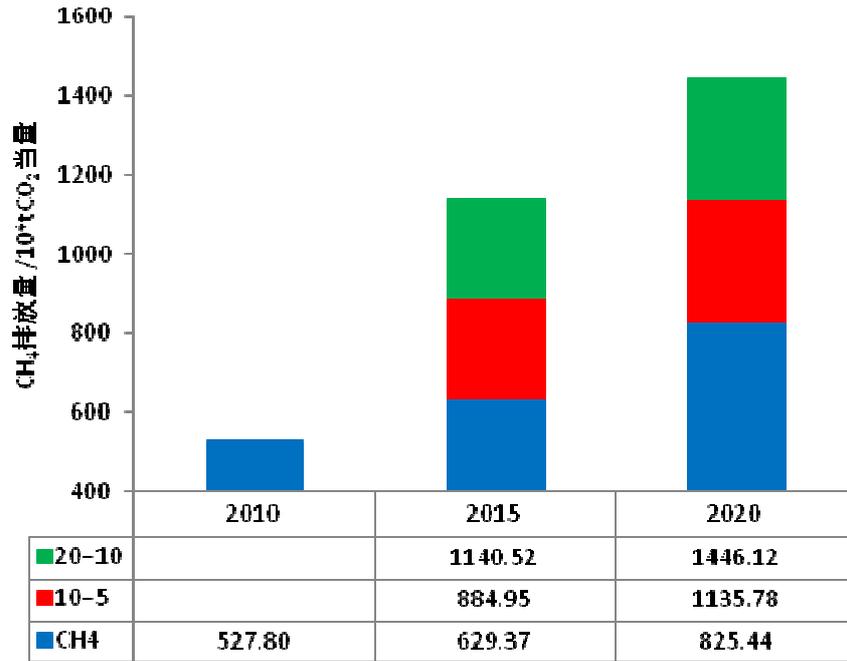


图 4-4 天然气-替代燃料 CH₄ 减排分析

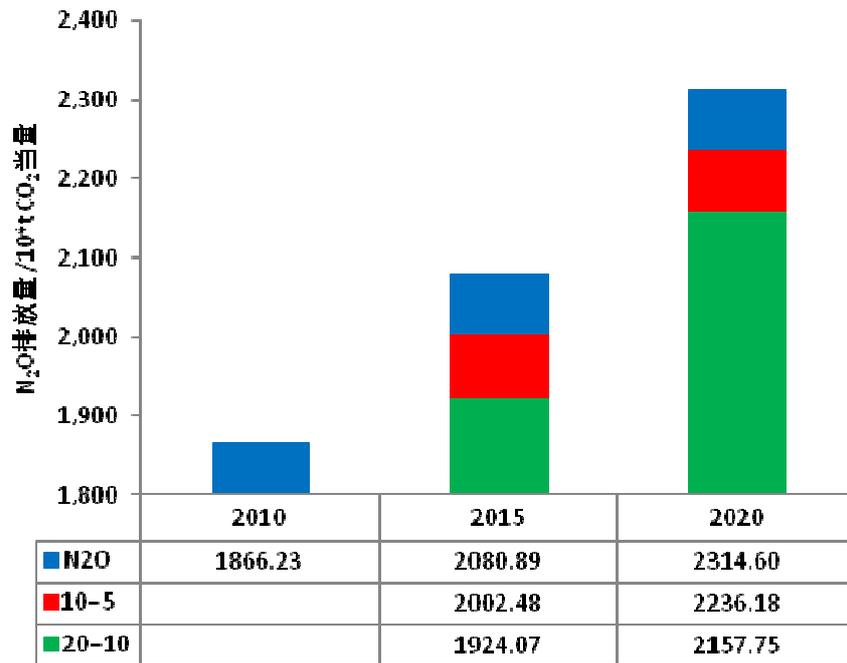


图 4-5 天然气-替代燃料 N₂O 减排分析

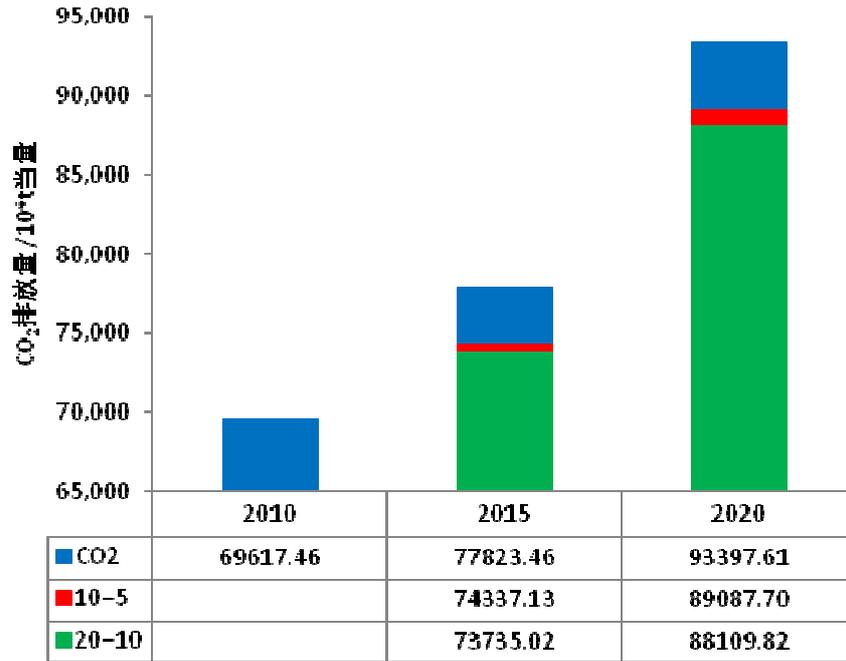


图 4-6 天然气-替代燃料 CO₂ 减排分析

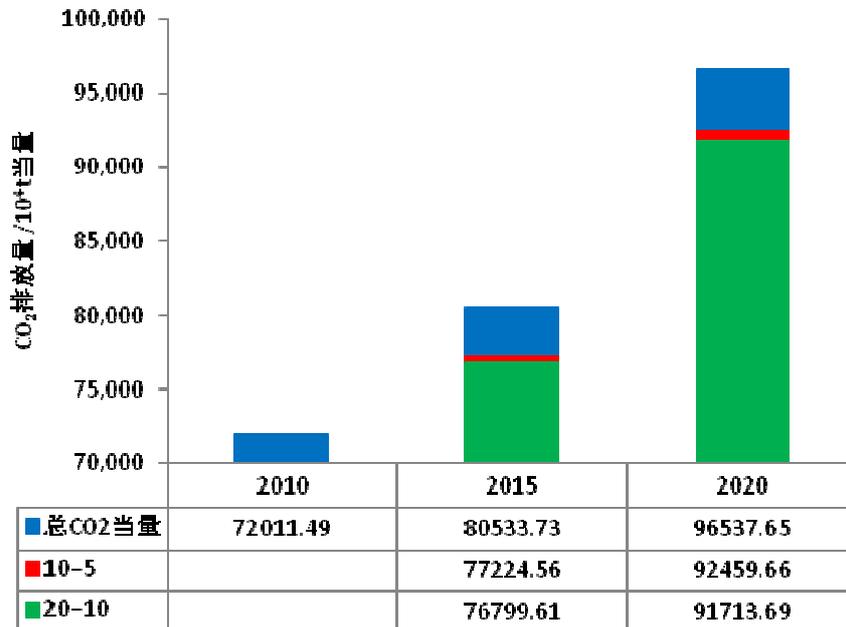


图 4-7 天然气-替代燃料尾气 GHGs 减排分析

表 4-6 天然气-替代燃料情景下温室气体减排比例/%

污染物	CH ₄		N ₂ O		CO ₂		总 CO ₂ 当量	
	10+5	20+10	10+5	20+10	10+5	20+10	10+5	20+10
2015	40.61	81.22	-3.77	-7.54	-4.48	-5.25	-4.11	-4.64
2020	37.60	75.19	-3.39	-6.78	-4.61	-5.66	-4.22	-5.00

考虑到汽车报废时，制冷剂残留量占总量的比例较大，若不进行制冷剂的回收，排放到大气中的量也是相当大的。为保证资源的循环利用，有必要在报废环节引入回收设备，对报废车辆的制冷剂进行循环再利用。这样不仅节省了资源，同时也将大大减少空调汽车制冷剂的排放。由于目前我国存在生产回收技术、设备回收能力以及回收经验匮乏等不足，故假设在 2020 年开始回收 50% HFC-134a 制冷剂。如表 4-7 所示，在制冷剂回收情景下，2020 年空调车 HFC-134a 排放量约为 3777.63×10^4 t CO₂ 当量，汽车空调制冷剂减排量约 417.78×10^4 t CO₂ 当量。

根据《京都议定书》等相关内容，我国需尽快淘汰 HFC-134a 空调车，改为 GWP 更小的制冷剂。其中 HFO-1234yf 的 GWP₁₀₀ 值仅为 4，同时对臭氧层破坏能力小，与 HFC-134a 相比，几乎对全球变暖没有贡献，是非常好的制冷剂替代品。本研究假设我国于 2016 起，新车开始采用 HFO-1234yf。在此情景下，2020 年 HFC-134a 排放量约为 1.74×10^4 t，HFO-1234yf 排放量约为 1.49×10^4 t，折算成 CO₂ 分别为 2264.43×10^4 t CO₂ 当量和 5.94×10^4 t CO₂ 当量，制冷剂减排量约 1925.03×10^4 t CO₂ 当量。

表 4-7 减排情景下 HFC-134a 排放辆（2020 年）/10⁴t

情景	HFC-134a 排放量/10 ⁴ t			
	初次填充排放	运行排放	清理排放	总计
基线 2020	1.08×10^{-2}	2.57	0.64	3.23
制冷剂回收	1.08×10^{-2}	2.57	0.32	2.91
制冷剂替换				
HFC-134a	0	1.10	0.64	1.74
HFO-1234yf	1.08×10^{-2}	1.47	0	1.49

分析上述各减排情景得出：在 2020 年基线排放情景的基础上，制冷剂替换可减排 26.24%，效果最为显著，其次是排放标准的加严，减排比例为 21.71%；制冷剂回收可减排 5.70%。与这三种减排情景不同的是，选用天然气作为替代燃料会导致非 CO₂ 类温室气体排放增加，但是 CO₂ 会有相应降低，以抵消因 CH₄ 排放增加带来的温室效应。

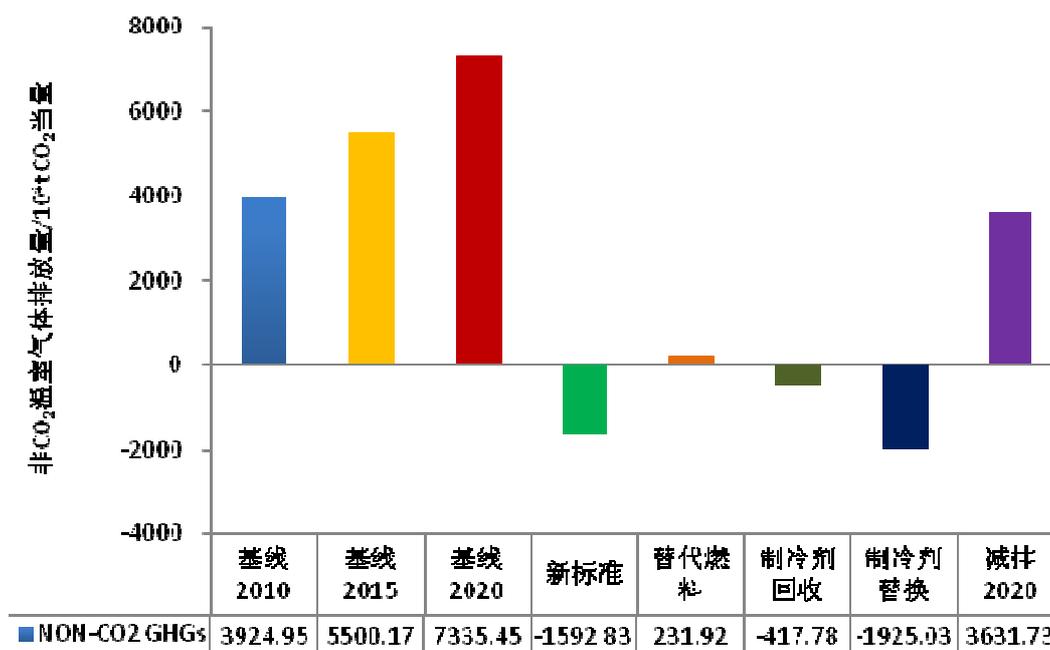


图 4-8 机动车非 CO₂ 类温室气体减排情景分析

注：a.新标准为轻型车分别于 2011 年和 2016 年执行国 IV、国 V 标准；重型车执行分别于 2013 年和 2016 年执行国 IV、国 V 标准；替代燃料为方案 1（10+5）；制冷剂回收是 2020 年 50%回收；制冷剂替换是自 2016 年起新车空调制冷剂由 HFC-134a 替换为 HFO-1234yf。
b.选用替代燃料非 CO₂ 温室气体排放增加 3.16%，但 CO₂ 可降低约 4%~6%。

4.3 小结

本研究结合相关减排措施以及我国关于资源节约和节能减排要求，在基线情景的基础上，针对 CH₄ 和 N₂O 作出了执行更加严格的排放标准和燃料替代 2 个减排情景预测，对于 HFC-134a 作出了制冷剂回收和替换 2 个减排情景分析。

(1) 在排放控制维持目前水平，机动车保有量增长维持目前速度，年均行

驶里程每隔 5 年下调 10%的基线情景下, 2020 年 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 三类机动车非 CO₂ 温室气体排放量分别为 39.31×10⁴t(825.43×10⁴t CO₂ 当量)、7.47×10⁴t (2314.60×10⁴t CO₂ 当量) 和 3.23×10⁴t (4915.41×10⁴t CO₂ 当量), 分别为 2010 年排放量的 1.56 倍、1.24 倍和 2.74 倍。

(2) 2020 年执行国 IV 和国 V 新标准后, CH₄ 和 N₂O 排放量分别减少 51.67% 和 50.39%; 选择天然气作为替代燃料减排方案虽然可以使 CO₂ 和 N₂O 略有降低, 但 CH₄ 排放量却急剧上升。综合考虑天然气作为替代燃料的温室效应, 机动车尾气排放温室气体的温室效应降低约 4%~5%。

(3) 对于 HFC-134a, 本研究进行了制冷剂回收和制冷剂替换两种减排情景分析。在 50%制冷剂回收的减排情景下, 2020 年汽车空调制冷剂 HFC-134a 减排 9.96%, 约 417.78×10⁴t CO₂ 当量; 而将 2016 年~2020 年新生产车辆选择 HFO--1234yf 作为制冷剂的情景下, 汽车空调制冷剂排放的温室效应可降低 45.88%

(4) 综合上述 4 个减排情景, 在 2020 年基线排放情景的基础上, 制冷剂替换可减排 26.24%, 效果最为显著, 其次是排放标准的加严, 减排比例为 21.71%; 制冷剂回收可减排 5.70%。与这三种减排情景不同的是, 选用天然气作为替代燃料会导致非 CO₂ 温室气体排放增加, 但是 CO₂ 会有相应降低, 以抵消因 CH₄ 排放增加带来的温室效应。

第5章 结论及建议

本研究对国内约 60 辆轻型汽油车、摩托车和重型柴油车进行了台架测试和实际道路排放测试，结合 10 余座典型城市的实地走访调查和大量的文献调研工作，获得了中国机动车活动水平及排放特征。基于上述基础信息，建立了 2010 年全国层面的机动车 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 三类非 CO₂ 温室气体排放清单，作出了不同的情景预测，并重点分析了机动车非 CO₂ 温室气体的减排潜力，为决策者开展机动车非 CO₂ 温室气体排放控制提供参考依据和技术支持。

通过上述工作，我们得出以下主要结论和建议：

(1) 在广泛文献调研的基础上，统筹结合目前机动车温室气体排放的特征研究建立了机动车非 CO₂ 温室气体排放测试及采样方法。其中轻型车采样方法主要依托整车台架结合 NEDC 工况以及尾气 CVS 稀释通道进行采样。对样品的分析主要采用 GC-FID/ECD、红外光谱法以及 HORIBA-ATS 汽车测试系统。在比较不同样品分析平台的同时完成样品测试，根据所得的污染物浓度、稀释比和转换系数得出最终的排放因子。

(2) 测试结果表明：轻型汽油车的 CH₄ 排放因子介于 0.017~0.064g/km 之间，而双燃料出租车 CH₄ 排放平均值高达 1.17g/km，摩托车 CH₄ 排放因子介于 0.029~0.054 g/km 之间。轻型汽油车 N₂O 的排放因子介于 0.008-0.076g/km 之间，与其他研究结果进行对比发现机动车 N₂O 排放因子随排放控制标准的加严而呈现先升高再降低的趋势，这可能会因为 TWC、SCR 技术在机动车上的广泛使用而有所升高，但是随着技术的不断改进其排放将会逐步降低。柴油货车的 N₂O 排放水平非常低，其最大值约为 0.014g/km。摩托车的 N₂O 排放因子则介于 0.014~0.025g/km。

(3) 2010 年中国机动车非 CO₂ 类温室气体 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 排放总量分别为 25.13×10^4 t (527.80×10^4 t CO₂ 当量)、 6.02×10^4 t (1866.23×10^4 t CO₂ 当量) 和 1.18×10^4 t (1530.92×10^4 t CO₂ 当量)，共计 3924.95×10^4 t CO₂ 当量，约为机动车温室效应污染物排放 (CO₂、CH₄、N₂O、HFC-134a 和 BC) 的 5%。其中，N₂O 和 HFC-134a 温室效应较为显著，排放分担率相对较高，分别为 47.55%

和 39.00%；CH₄ 虽然排放总量最大，但因其 GWP 值远低于 HFC-134a 和 N₂O，故在机动车非 CO₂ 类温室气体中排放分担率最小。在 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 中，轻型客车（汽油车和双燃料车）是排放的主要车型，均占 50%以上。

（4）在排放控制维持目前水平，机动车保有量增长维持目前速度，年均行驶里程每隔 5 年下调 10%的基线情景下，2020 年 CH₄、N₂O 和 HFC-134a 三类机动车非 CO₂ 温室气体排放量分别为 $39.31 \times 10^4 \text{t}$ 、 $7.47 \times 10^4 \text{t}$ 和 $3.23 \times 10^4 \text{t}$ ，其中 2020 年 CH₄、N₂O 排放总量将比 2010 年分别增长 56%和 24%，HFC-134a 将增长 1.74 倍。

（5）在 2020 年基线排放情景的基础上，制冷剂替换可减排 26.24%，效果最为显著，其次是排放标准的加严，减排比例为 21.71%；制冷剂回收可减排 5.70%。与这三种减排情景不同的是，选用天然气作为替代燃料会导致非 CO₂ 温室气体排放增加 3.16%，但是 CO₂ 会有较大幅度降低，足以抵消因 CH₄ 排放量增加带来的温室效应。

参考文献

- [1] Draft Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990 – 2009.
- [2] Climate Change 2007 Synthesis Report (IPCC).
- [3] Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2005 and inventory report 2007.
- [4] D'Angiola, A., et al., On-road traffic emissions in a megacity. *Atmospheric Environment*, 2010. 44(4): 483-493.
- [5] Beer, T., et al., Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. *Atmospheric Environment*, 2002. 36(4): 753-763.
- [6] Graham, L.A., et al., Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles. *Atmospheric Environment*, 2008. 42(19): 4665-4681.
- [7] Nam, E.K., T.E. Jensen, and T.J. Wallington, Methane Emissions from Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2004. 38(7): 2005-2010.
- [8] Huai, T., et al., Estimates of the emission rates of nitrous oxide from light-duty vehicles using different chassis dynamometer test cycles. *Atmospheric Environment*, 2004. 38(38): 6621-6629.
- [9] Behrentz, E., et al., Measurements of nitrous oxide emissions from light-duty motor vehicles: a pilot study. *Atmospheric Environment*, 2004. 38(26): 4291-4303.
- [10] Becker, K.H., et al., Nitrous Oxide (N₂O) Emissions from Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 1999. 33(22): 4134-4139.
- [11] Graham, L.A., S.L. Belisle, and P. Rieger, Nitrous oxide emissions from light duty vehicles. *Atmospheric Environment*, 2009. 43(12): 2031-2044.
- [12] Stemmler, K., et al., Emissions of the Refrigerants HFC-134a, HCFC-22, and CFC-12 from Road Traffic: □ Results from a Tunnel Study (Gubrist Tunnel, Switzerland). *Environmental Science & Technology*, 2004. 38(7): 1998-2004.
- [13] Siegl, W.O., et al., R-134a Emissions from Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2002. 36(4): 561-566.
- [14] Wallington, T.J., J.L. Sullivan, and M.D. Hurley, Emissions of CO₂, CO, NO_x, HC, PM, HFC-134a, N₂O and CH₄ from the global light duty vehicle fleet. *Meteorologische Zeitschrift*, 2008. 17(2): 109-116.
- [15] Procedure for Determination of Nitrous Oxide in Automotive Exhaust by Fourier Transform Infrared Spectroscopy, California Environmental Protection Agency Air Resources Board
- [16] 张清宇, 魏玉梅, 田伟利. 机动车排放控制标准对污染物排放因子的影响[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(5):606-612.

- [17]赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市居民出行方式与城市交通 CO₂ 排放及减排对策[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 747-752.
- [18] 何春玉, 王歧东. 运用CMEM模型计算北京市机动车排放因子[J]. 环境科学研究, 2006, 19(1):109-112.
- [19]中华人民共和国环境保护部. 2011年中国机动车污染防治年报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2011,12.
- [20]中华人民共和国国家统计局, 中国统计年鉴(1997-2010) [EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2011[2013-03-25]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2011/indexch.htm>
- [21]中国汽车技术研究中心, 中国汽车工业协会. 中国汽车工业年鉴[M]. 北京: 中国汽车工业年鉴期刊社, 2011
- [22]中华人民共和国交通运输部交通科技信息资源共享平台. 1998-2011年城市出租汽车数量统计表 [EB/OL]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2013[2013-04-18]. http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/tongjigongbao/hangyenianjian/201009/t20100927_844779.html
- [23] Jackson T R. Fleet Characterization Data for MOBILE6 Development and Use of Age Distributions, Average Annual Mileage Accumulation Rates and Projected Vehicle Counts for Use in MOBILE6[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, EPA420-P-99-011, 1999.
- [24]于雷, 乔凤翔, 刘娟. 基于采样交通量与路段特征车辆行驶里程(VMT)估算模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5(1): 38-46.
- [25]杨方, 于雷. 利用小样本调查数据调整北京市车里程累积率[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(2): 82-85, 90.
- [26]吴大磊, 林怡青, 彭美春, 等. 利用小样本数据计算车辆年平均行驶里程的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 155-160.
- [27] Huo Hong, Zhang Qiang, HE Kebin, et al. Vehicle-use intensity in China: Current status and future trend [J]. Energy Policy, 2012, (43):6-16.
- [28]林秀丽, 汤大钢, 丁焰, 等. 中国机动车行驶里程分布规律[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 377-380.
- [29]申现宝. 农用运输车排放特征研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2010.
- [30] Liu Huan, He Chunyu, Lents J, et al. Beijing Vehicle Activity Study[EB/OL]. ISSRC, 2005[2013-02-18]. <http://www.issrc.org>
- [31] Huang Cheng, Pan Hansheng, LENTS J, et al. Shanghai Vehicle Activity Study[EB/OL]. ISSRC, 2005[2013-02-18]. <http://www.issrc.org>

- [32] Zachariadis T, Ntziachristos L, Samaras Z. The effect of age and technological change on motor vehicle emissions [J]. *Transportation Research Part D* 6, 2001: 221-227.
- [33] Becker K H, LÖRZER J C, Kurtenbach R, et al. Nitrous Oxide (N₂O) Emissions from Vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(22): 4134-4139.
- [34] Nam E K, Jensen T E, Wallington T J. Methane emissions from vehicles[J]. *Environmental science & technology*, 2004, 38(7): 2005-2010.
- [35]中华人民共和国公安部.GA802—2008, 机动车类型 术语和定义[S], 北京: 中华人民共和国公安部, 2008.
- [36] Huo Hong, Wang M, Johnson L, et al. Projection of Chinese motor vehicle growth, oil demand, and CO₂ emissions through 2050 [J].*Transportation Research Record*, 2007,(2038):69-77.
- [37] Huo Hong, Wang M. Modeling future vehicle sales and stock in China[J]. *Energy Policy*, 2012, (43):17-29.
- [38]姚志良, 张明辉, 王新彤,等. 中国典型城市机动车排放演变趋势[J]. *中国环境科学*, 2012,32(9):1565-1573.
- [39]解淑霞, 胡京南, 鲍晓峰,等. 天然气-汽油双燃料车实际道路排放特性研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(11): 2347-2353.
- [40]姚志良, 王岐东, 王新彤, 等. 典型城市机动车非常规污染物排放清单[J]. *环境污染与防治*,2011, 33(3): 96-101.
- [41]蔡皓, 谢绍东.中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2010, 46(3): 319-326.
- [42] Watling T C, Ravenscroft M R, Avery G . Development, validation and application of a model for an SCR catalyst coated diesel particulate filter[J]. *Catalysis Today*, 2012, 188(1), 32-41.
- [43] Becher K H, LÖRZER J C, Kurtenbach R, et al. Contribution of vehicle exhaust to the global N₂O budget[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(3-4): 387-395.
- [44]蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国道路交通二氧化碳排放研究[J]. *中国能源*, 2011, 33(4): 26-30
- [45]蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国交通二氧化碳排放研究[J]. *气候变化研究进展*, 2011,7(3):197-203.
- [46] US Environmental Protection Agency. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2010 [R]. EPA 430-R-12-001, 2012, 4.
- [47]北京大学环境科学与工程学院. 控制管理氢氟碳化物 (HFCs) 影响研究[R]. 北京: 北京大学, 2013.

[48] IPCC. 国家温室气体清单优良作法指南. 2006