

AEI-SAES-Re.
G-0309-07094/00138.07
NO: 2005-003

上海交通现状与机动车污染状况 及污染暴露 - 反应关系

- 机动车污染控制与健康效益
及其实现交通环境可持续发展的技术政策障碍研究

阶段工作成果汇报

Transportation Situation and Traffic Air Pollution Status in Shanghai, and Literature Survey on Air Pollution Exposure-Response Studies

- Vehicle Emission Control and Health Benefit, and
the Technical and Policy Barrier for Approaching A Sustainable
Transport
(Part One Report, Draft)

上海市环境科学研究院
Shanghai Academy of Environmental Sciences
Shanghai, China
January 27, 2005

上海交通现状与机动车污染状况 及污染暴露 - 反应关系

- 机动车污染控制与健康效益
及其实现交通环境可持续发展的技术政策障碍研究
阶段性成果
(美国能源基金会与壳牌基金会资助项目)

项目资助单位 美国能源基金会、壳牌基金会

项目执行期 2004 年 1 月 - 2005 年 1 月 31 日

项目批准号 G-0212-06632 , 00138.07

项目负责人 陈长虹 , 副总工程师 , 上海市环境科学研究院
陈秉衡 , 教授 , 复旦大学公共卫生学院
伏晴艳 , 高级工程师 , 上海市环境监测中心

课题组成员 : 景启国 , 助理工程师 , 上海市环境科学研究院
阚海东 , 博士 , 复旦大学公共卫生学院
李 莉 , 助理工程师 , 上海市环境科学研究院
潘汉生 , 助理工程师 , 上海市环境科学研究院
陈国海 , 高级工程师 , 上海市环境监测中心
黄海英 , 助理工程师 , 上海市环境科学研究院
王冰妍 , 工程师 , 上海市环境科学研究院
陈明华 , 高级工程师 , 上海市环境科学研究院
裘季冰 , 工程师 , 上海市环境科学研究院
黄 成 , 硕士研究生 , 华东理工大学
戴 懿 , 硕士研究生 , 华东理工大学
王海鲲 , 硕士研究生 , 华东理工大学
赵 静 , 硕士研究生 , 华东理工大学

上海交通现状与机动车污染状况 及污染暴露 - 反应关系

- 机动车污染控制与健康效益
及其实现交通环境可持续发展的技术政策障碍研究
阶段性成果
(美国能源基金会与壳牌基金会资助项目)

作 者

陈长虹 景启国 李 莉
阚海东 黄 成 潘汉生 王海鲲
戴 懿 黄海英 赵 静

合作者

陈国海 王冰妍 钱 华 戴海夏
蔺宏轶 王少俊

上海市环境科学研究院

January 27, 2005

联系方式

交通与环境是当前上海市国民经济和社会发展面临的热点问题 ,本课题组在美国能源基金会和壳牌基金会的资助下 ,经过近一年的探索和交通环境实地测量 ,初步摸清了导致当前上海市交通环境问题的主要症结 ,并在此基础上提出阶段性研究结果 ,供有关部门参考。由于作者水平所限 ,研究可能存在许多不足之处 ,希望各位专家在审阅此报告时多提建设性意见 ,并敬请批评指正。

上海市机动车污染控制与健康效益研究
上海市交通与环境可持续发展指标体系研究 课题组

上海市环境科学研究院

地址 : 上海市钦州路 508 号

邮编 : 200233

电话 : +86-21-6408 5119

传真 : +86-21-6484 7827

陈长虹联系方式

电话 : +86-21-6408 5119 × 2506

传真 : +86-21-6484 7827

Email: chench@saes.sh.cn

目 录

第一篇 上海市国民经济、社会发展与交通环境状况	1-1
项目执行总结	0-1
1. 项目背景.....	0-1
2. 研究目的.....	0-1
3. 项目进程.....	0-1
4. 主要研究成果.....	0-2
5. 报告组成.....	0-3
6. 下阶段工作计划.....	0-3
第一章 上海国民经济与社会发展概况	1-1
1. 行政区划.....	1-1
1.1 中央商务区	1-1
1.2 中心商业区	1-1
1.3 内环线以内区域.....	1-1
1.4 内外环线以内区域.....	1-1
1.5 外环线以外区域.....	1-2
2. 人口密度与人口分布	1-2
3. 国民经济发展状况	1-3
4. 劳动力与就业岗位	1-4
5. 城市居民收入.....	1-4
6. 城市居民消费性支出	1-4
7. 小结	1-6
第二章 城市交通环境状况	2-1
1. 经济发展与交通运输	2-1
1.1 经济发展与客运总量的变化	2-1
1.2 经济发展与货运总量	2-2
2. 城市道路交通条件	2-2
2.1 道路建设	2-2
2.2 道路网络	2-3
2.3 道路指标	2-3
2.4 城市公交线路长度	2-4

3. 机动车保有量与车辆组成.....	2-5
3.1 机动车保有量变化	2-5
3.2 车辆组成	2-6
4. 居民出行方式及运输量.....	2-6
4.1 公交车	2-7
4.2 出租车	2-7
4.3 轨道交通	2-8
4.4 私人交通	2-8
4.5 公务车	2-9
4.6 自行车	2-9
5. 交通饱和和状况.....	2-9
6. 交通安全现状.....	2-11
7. 停车场分布.....	2-12
8. 小结.....	2-13

第三章 城市交通运行工况测试和机动车技术调查	3-1
1. 前言	3-1
2. 测试地点和道路的选择.....	3-1
3. 调查方法.....	3-2
3.1 车辆行驶工况调查.....	3-2
3.2 车辆技术调查.....	3-3
3.3 车流量及车流比例调查.....	3-4
3.4 车辆启动分布调查.....	3-5
4. 调查和测试设备	3-5
5. 数据结果.....	3-5
5.1 各种机动车工况点分布 (速度 - 加速度)	3-5
5.2 不同道路车流的时间 - 速度分布特征及工况点分布.....	3-9
5.3 上海市车龄分布.....	3-18
5.4 上海市车辆技术特点.....	3-20
5.5 车辆的 VSP Bins 分布	3-22
5.5 车辆停滞时间分布.....	3-27
6. 小结.....	3-27

第四章 机动车排放因子测试	4-1
1. 前言	4-1
2. 测试设备	4-1

3. 测试方法.....	4-2
4. 测试车辆.....	4-2
5. 数据处理.....	4-4
5.1 NO _x 湿度校正.....	4-4
5.2 以尾气流量计算的瞬时质量排放 (g/s)	4-4
5.3 瞬时油耗特征排放 (g/kg fuel)	4-5
5.4 累计行驶里程特征排放 (g/km)	4-6
6. 数据结果.....	4-6
6.1 工况分布特点.....	4-6
6.2 加速度 - 油耗分布特征.....	4-8
6.3 污染物排放的瞬时浓度分布.....	4-9
6.4 排放因子.....	4-10
6.5 工况与排放系数汇总.....	4-11
7. 小结.....	4-15

第五章 上海市机动车大气污染物排放清单 5-1

1. IVE 模型结构	5-1
2. 计算原理	5-2
3. 结果	5-3
3.1 机动车出行里程及启动分布	5-3
3.2 上海市机动车污染物排放结果	5-5
4. 小结	5-9

第六章 环境空气质量状况 6-1

1. 大气污染监测点位分布	6-1
2. 大气污染监测与频率与监测方法	6-1
3. 环境空气质量状况	6-2
4. 小结	6-13

第七章 二氧化氮 (NO₂) 与其不良健康影响暴露 - 效应关系的建立 7-1

1. 前言	7-1
2. 临床实验研究	7-1
2.1 肺功能及症状	7-1
2.2 气道反应性	7-2
2.3 肺灌洗和呼吸道防御反应	7-2

3. 流行病学研究	7-2
3.1 NO ₂ 对居民每日死亡率的影响	7-2
3.2 二氧化氮对发病率的影响	7-3
3.2.1 二氧化氮对学龄儿童呼吸系统疾病影响的 meta 分析	7-3
3.2.2 NO ₂ 对 2 岁以下儿童呼吸系统疾病影响的 meta 分析	7-6
4. 总结	7-7
参考文献 :	7-9

第八章 大气颗粒物暴露与人群健康效应暴露 - 反应关系的 meta 分析 8-1

1. 前言	8-1
2. 材料与方法	8-1
3. Meta 分析	8-2
4. 结果	8-3
4.1 总死亡率 (慢性, 30 岁成人)	8-3
4.2 患病终点	8-3
5. 讨论	8-8
参考文献 :	8-10

第九章 伤残调整生命年 (DALY) 在大气污染健康危险度评价中的应用 9-1

1. 前言	9-1
2. 方法	9-1
2.1 空气污染浓度	9-1
2.2 人群暴露于大气污染的水平	9-2
2.3 健康效应评估	9-2
2.4 大气污染造成的 DALY 损失估计	9-2
3. 结果	9-2
3.1 上海总人群的 PM ₁₀ 暴露评估	9-2
3.2 健康效应评估	9-3
3.3 大气污染所致的 DALY 损失	9-4
4. 讨论	9-4
参考文献	9-5

第十章 结论与建议 7-1

1. 结论	7-1
2. 建议	7-2

项目执行总结

1. 项目背景

上海是中国人口最多、经济活动量最大的百万人城市，随着经济的增长和人均收入的提高，交通运输需求量亦在不断提高。尤其是进入 2003 年后城市机动车增长十分迅速，到 2003 年底全市机动车保有量已经达到 200 万辆(含助动车)。

尽管上海市自 1997 年开始实施车用汽油无铅化，1999 年 7 月 1 日和 2003 年 3 月 1 日新车分别实施欧洲 I 号和欧洲 II 号标准，但是 2004 年的环境监测资料显示，上海市与机动车排放相关的大气污染状况并没有得到明显改善，全市 NO_x 仍然持续升高、PM₁₀ 仍然保持较高的污染水平，同时 2010 年上海世博会逐渐临近，因此如何有效降低机动车污染，改善上海市环境空气质量，提高市民健康水平，是摆在上海市政府和上海市城市管理面前的重大课题。

为此，上海市环境科学研究院于 2004 年初在美国能源基金会和美国世界资源研究所 EMBARQ 的资助下，围绕上海市环境管理需求，针对机动车污染，立项开展了“上海市机动车污染与健康效益研究”和“上海市交通与环境可持续发展指标体系研究”，旨在为上海市降低机动车污染排放，改善城市环境空气质量、提高上海市民健康水平、实现交通环境可持续发展提供决策支持。

考虑到“上海市机动车污染与健康效益研究”和“上海市交通与环境可持续发展指标体系研究”前期研究内容的相似性和互补性，故我们将两项研究的成果合并，形成本综合研究报告，以便为后续的健康影响分析和建立可持续发展指标体系提供系统的和完整的材料。

请在具体研究内容中明确指出哪些由EMBARQ支持，那些由EF支持。（建议将与机动车单车控制交通环境污染相关内容作为EF支持，其他关于宏观经济发展和交通系统的由EMBARQ支持）

2. 研究目的

“上海市机动车污染与健康效益研究”的目的是，根据上海市经济发展和机动车迅速增长的新的形势，在开展机动车行驶工况调查和车辆技术调查及大气污染调查和流行病学调查的基础上，建立经济发展与机动车拥有量之间的关系，建立大气污染暴露 - 反应关系，根据交通部门近期所做的研究和机动车拥有量的预测结果，利用 IVEM 模型和环境空气质量模型，开展机动车污染控制与排放情景分析，大气污染暴露水平研究，及相应的健康效益分析。

以 2010 年上海市举办世博会为时间节点，研究上海市轻型车在 2010 年之前提前执行欧洲 4 号标准的可行性，重型车大气污染物排放控制措施，以及这些措施的综合健康效益，以改善上海市环境空气质量。并向政府部门提出相关建议。

“上海市交通与环境可持续发展指标体系研究”是在“上海市机动车污染与健康效益研究”的基础上，通过识别与交通环境可持续发展相关领域及基础指标，建立交通环境可持续发展评价指标体系，以实现“回顾过去，解析现状和指导未来”上海交通环境可持续发展的目的。前期的工作重点是交通环境可持续发展相关领域及基础指标的识别，及重型车实际道路的大气污染物排放测试。

两个项目第一阶段的工作目标是 ,收集交通环境资料、了解机动车行驶工况、建立上海市机动车排放清单。

3. 项目进程

本项目 (Phase I) 自 2004 年 2 月 1 日启动至 2005 年 1 月 31 日 , 先后完成了以下研究工作 :

- (1) 上海市社会经济发展和城市大气污染监测资料收集与评价 ;
- (2) 2004 年 6 月在美国能源基金会的帮助下 , 与美国 UCR 合作 , 采用 GPS 、 VOCE 及摄像等技术手段 , 在上海市联合开展机动车行驶工况、车流量记录、车辆启动频率、车辆技术分类等调查 , 掌握了上海市机动车在实际道路上的日行驶里程分布曲线、道路车流分类、车速日变化曲线、以及车辆的详细技术分类等关键技术参数 , 为建立上海市机动车排放清单奠定了基础 ;
- (3) 2004 年 9 月 ~10 月 , 在美国世界资源研究所 EMBARQ 的帮助下 , 与美国 EPA 合作 , 利用美国 Sensor's 公司生产的 SEMTECH-D 车载排放测试仪 , 分别在高速公路、城市主干道和城市次干道上开展了中型车和重型车实际道路的排放测试 , 为中国机动车污染控制提供了极其重要的技术资料。
- (4) 在上述基础上 , 与美国 UCR 合作 , 建立了基于机动车行驶里程、车流分布、技术分类以及车辆比功率变化的上海市机动车大气污染物排放模型 (即 IVERM) , 并提出上海市机动车排放清单 ;
- (5) 在上海市 18 个交通路口 , 开展机动车污染调查 , 掌握了交通干线的大气污染状况 ;
- (6) 收集国内外大气污染和流行病学资料 , 并形成了“大气 PM₁₀ 污染与居民健康效应的暴露 - 反应关系分析”、“大气 NO₂ 污染与居民健康效应的暴露 - 反应关系分析”、以及“DALY 指标在大气污染健康危险度评价中的应用”等研究报告。

4. 主要研究成果

通过研究获得以下研究结果 :

1. 上海市的社会经济发展正处在快速增长阶段 , 到 2004 年底全市 GDP 增长率已连续 12 年超过 10% , 交通需求和机动车保有量与 GDP 呈现良好的线性关系。这一结果预示 , 随着全市国内生产总值的增加和收入水平的继续提高 , 上海市的交通运输需求和机动车保有量还将继续上升。
2. 经过 10 余年的交通建设 , 上海市各项交通指标 , 如道路长度、道路宽

度、人均道路长度、人均道路面积等，有了长足的进步。但是历史资料也显示，非机动车和人行道宽度正在逐步变窄。这，在某种程度上意味着，上海市是以（部分）牺牲机动车道和人行道为代价，为车辆出行提供了便利。正是由于这一原因，为今天的上海市交通拥堵创造了部分条件。

非

3. 机动车行驶工况测量结果显示，上海市交通运输的整体速度不高，公交车的平均车速为 12.0 km/h，卡车为 18.3 km/h，出租车为 28.3 km/h。在中心城区主干道，车流的平均车速仅为 10.0 km/h，商业区主干道的平均车速为 13.2 km/h，城郊结合部的平均车速为 18.1 km/h。机动车保有量快速增长和交通设施的完备性不足是造成目前上海城市交通拥堵的重要因素之一。
? 交通结构问题
4. 由于部分车道机非混行严重，机动车加减速频繁，机动车发动机常处于急加速和急减速的恶劣工况，因此机动车单车污染物排放量较高。实测结果显示，被测重型车辆空载时在城市综合道路上的 CO 平均排放因子为 $5.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $2.1\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $6.5\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，而其在满载时 CO 平均排放因子可达 $22.5\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $2.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $7.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ；公交车在其固有路线上 CO 平均排放因子为 $3.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $2.1\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $4.7\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ ；轻型车 CO 平均排放因子为 $1.0\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $0.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $4.0\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 。
(工况V.S.控制结束) 实测V.S.标准工况
5. SIVEM 模型的计算结果显示，上海市机动车 CO、VOC、NOx、PM 以及 CO_2 年排放量分别达到 42.1 万吨、6.4 万吨、6.6 万吨、0.17 万吨和 753 万吨，其中 CO、VOC 以及 PM 有将近 20% ~ 30% 来自启动排放；在机动车大气污染物排放中 重型车 CO 排放量占总量的 40% 左右，NOx 排放量占 67%，PM 占 53%。重型车是造成上海市大气污染的重要污染源之一。
6. 道路交通污染监测结果显示，18 个测量点上有 16 个测量点的 NOx 小时平均浓度超过国家环境空气质量二级标准，最大小时平均浓度值近 $0.5\text{ mg}/\text{m}^3$ ，是国家二级质量标准（小时标准： $0.30\text{ mg}/\text{m}^3$ ）的 1.6 倍；最大小时浓度值近 $1.0\text{ mg}/\text{m}^3$ ，是国家二级质量标准（小时标准： $0.30\text{ mg}/\text{m}^3$ ）的 3.3 倍。 PM_{10} 日平均浓度值达 $0.32\text{ mg}/\text{m}^3$ ，是国家二级质量标准（小时标准： $0.15\text{ mg}/\text{m}^3$ ）的 2.1 倍； PM_{10} 日平均浓度最大值达 $1.2\text{ mg}/\text{m}^3$ ，是国家二级质量标准（小时标准： $0.15\text{ mg}/\text{m}^3$ ）的 8 倍。
超标频率??
7. 二氧化氮 (NO_2) 是典型的交通型大气污染物。本报告系统综述并定量评价了 NO_2 对儿童和成人各项健康终点的影响，尤其是其对婴幼儿及学龄儿童下呼吸道症状和疾病产生的影响。结果发现， NO_2 对居民每日死亡率的效应易受到其它污染物的混杂影响；因此， NO_2 对死亡影响的单

独评价，尚需更多研究的证实。对 5 - 12 岁儿童下呼吸道症状和疾病的综合 meta 分析表明，NO₂ 浓度每增加 28.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，呼吸道症状和疾病发生增加 20%。此外，对 2 岁或更小的儿童，没有发现 NO₂ 暴露与呼吸系统症状、疾病的流行有关联。本部分所建立的二氧化氮的暴露 - 反应关系，可用于交通型大气污染的健康危险度评价工作。

8. 各种主要大气污染物中，大气颗粒物与居民健康的关系最为密切。为获取适合我国的颗粒物 - 健康效应的暴露 - 反应关系，本部分在联机检索国内外文献的基础上，确定了各健康效应终点的定量暴露 - 反应关系；我们采用 meta 分析的方法对多篇文献的综合进行评价，并估算了从发病到死亡各个健康效应终点上，大气颗粒物浓度每升高一定单位，人群不良健康效应发生的相对危险度。本部分所建立的暴露 - 反应关系，可推广用于我国及各城市大气污染（包括交通型大气污染）的健康危险度评价工作。
9. 本研究尝试将伤残调整生命年（DALYs）这一新的指标应用于大气污染的健康危险度评价工作。我们运用流行病学研究得到的暴露---反应关系系数来计算上海 2000 年由于空气污染所致的死亡和疾病例数；然后，估计相应的 DALY 损失。结果发现 2000 年上海大气污染共导致的 DALY 损失为 103,064；在总的 DALY 损失中，早死和慢性支气管炎占大部分。该研究结果可为控制上海大气污染，特别是户外空气污染提供了依据。本研究采用的技术路线和指标可应用于“**上海交通型大气污染与居民健康项目**”的下一阶段工作。
10. 如果要降低机动车污染排放，提高 2010 年上海世博会期间的上海市环境空气质量，改善市民生活质量，上海市可选择的措施包括：
 - (1) 实施城市建设的重点的转移，从核心区或中心城区转向城市外围地区，加强外围区的规划与建设；
 - (2) 在城市交通建设上，除大力发展公共交通外，应为非机动车和行人留有足够的出行空间，减少非机动车和行人对机动车行驶的干扰，提高车辆运行效率；
 - (3) 在机动车污染控制方面，上海市应充分估计到车辆快速增长可能产生排放对市民健康所造成的负面影响，为此提前实施欧洲 4 号标准是可接受的方案之一；
 - (4) 除此之外，全市应尽早建立机动车 IM 计划，以减小机动车排放的裂化水平；
 - (5) 为解决机动车流动性的特点，上海市可主动与长三角各省市联系，建立区域性机动车污染控制协作网络，加强机动车污染控制，以整

体改善长三角的环境空气质量。

5. 报告组成 (6)重型车队、特殊车队的污染控制！

本研究报告由 10 个章节组成：第 1 章主要介绍了上海市国民经济和社会发展状况及城市居民收入。第 2 章为城市交通环境状况，重要描述了上海市的交通运输量，交通条件和道路建设相关指标。第 3 章介绍了测量得到上海市机动车行驶工况、启动频率和机动车的技术分类，以及速度 - 加速度工况点分布等关键性参数。第 4 章描述了本研究采用 SEMTECH-D 开展重型车实际道路排放测试的结果。第 5 章重点介绍了采用 SIVEM 计算得到的上海市机动车大气污染物排放清单。第 6 章着重描述了道路交通的污染状况。第 7 章和第 8 章分别介绍了 NO₂ 和 PM₁₀ 的暴露 - 反应关系。第 9 章介绍了 DALY 指标在大气污染健康危险度评价中的应用。第 10 章为本项目第一阶段研究的结论与建议。

6. 下阶段工作计划

根据项目工作计划，“上海市机动车污染与健康效益研究”第二阶段工作将于 2005 年 2 月启动，届时将开展以下工作，其研究将逐步被“上海市交通与环境可持续发展指标体系研究”所采用：

1. 采用 SIVEM 模型开展机动车增长和交通运输增长的排放预测；
2. 利用 SIVEM 模型开展机动车污染控制的情景分析，其中包括 BAU 情景、IM 计划情景、严化标准的情景、机动车总量控制情景；
特殊车队的污染控制- Retrofit
3. 采用大气质量模型预测上海市大气污染物暴露水平；
4. 按 NO₂ 和 PM₁₀ 暴露 - 反应关系，采用 DALY 大气污染健康危险度评价方法开展各种排放控制情景的健康终点效应研究，并开展健康经济学计量分析。
5. 提出中期针对世博会，长期至2020年的上海机动车污染控制行动方案（针对单车），控制非交通系统

“上海市交通与环境可持续发展指标体系研究”下阶段的主要工作内容包括：

1. 根据 2004 年上海市交通 OD 调查，更新报告中已有的交通数据；
2. 根据文献调查，经中外双方讨论，确定上海市交通环境可持续发展目标；
3. 在专家咨询的基础上，采用层次分析法，计算各指标的系统权重；
4. 吸纳“上海市机动车污染与健康效益研究”成果，开展交通发展与环境建设的可持续性方案分析；
5. 建立和实现交通环境可持续发展评价指标体系的可视化表达。

第一篇 上海市国民经济、社会发展与交通环境状况

第一章 上海国民经济与社会发展概况

上海，简称沪，位于北纬 31 度 14 分，东经 121 度 29 分，是我国重要的经济中心、航运中心和国家历史文化名城。它北界长江，东濒东海，南临杭州湾，西接江苏、浙江两省。地处我国南北海岸线的中部，其交通便利，腹地广阔，地理位置优越，是良好的江海港口城市，上海全境除西南部有少数残丘外，全为坦荡低平的长江三角洲冲击平原的一部分，平均海拔高度 4 米左右。上海市面积 6340 平方公里，占全国总面积的 0.06%，其中陆地面积 6218 平方公里，水面面积 122 平方公里，南北长约 120 公里，东西宽约 100 公里。

位置

1. 行政区划

目前，上海市土地按所有制类型划分，可分为国有土地和集体土地，具体用地类型有商业、工业、仓储、市政绿化、住宅、交通、特种用地、水域、农业、其他等十大类。在各类用地中，占地面积最大的是水域和农业用地，为 4628 平方公里，占上海总面积的 72%。除了这两类用地，占地面积最大的为住宅用地。

1.1 中央商务区

上海的中央商务区是指浦西的外滩与河南路、人民路、天潼路、长治路、公平路与复兴路之间和浦东的小陆家嘴地区，区域范围约为 5 平方公里，是决定上海能否建成“三个中心”的关键所在。

1.2 中心商业区

中心商业区是指北抵天目路、老北站附近，西到乌鲁木齐路、万航渡路，南到复兴路、陆家浜路，东到浦东的陆家嘴地区，面积约 30 平方公里，是上海中心城区人口最密集的地区，也是商业、贸易、金融等第三产业十分繁荣的地区。

1.3 内环线以内区域

是以

内

内环线以内三产为主的综合功能区，包括内环线以内、中心商业区以外的环形区域，面积约 100 平方公里。本环区是中心城区工业布局最集中的地区，据统计，有工业企业 3000 多家，工业总产值和利润占中心城区总数的 60% 以上，工业用地占城市总用地的比例高达 30% 以上，是市区平均水平的 1.7 倍左右。工业布局类型，主要是相对集中的工业街坊和众多分散的工业点。从今后发展需求看，本区域应以批发贸易、部分无污染的城市型工业和居住区为主体。

1.4 内外环线以内区域

之间

该地区包括浦东新区、闵行区的一部分和宝山区的大部分，面积约为 620 平方公里。主要分布有城市边缘的 9 个工业区、若干大型住宅区及各类批发市场、储运中心等。本区今后将重点加强交通道路、商业网点以及文、教、卫等服务

设施的建设，从而，将形成若干个功能比较齐全的综合分区，做到就地生产，就地生活、增强综合分区的凝聚力，起到减少对市中心的向心压力的作用。

1.5 外环线以外区域

在本圈层内，除金山、宝山、安亭几个大工业基地外，在地域上，主要包括“改县建区”前的郊区县及嘉定大部分。在这个地域范围，目前主要有两个问题：一是乡镇工业布局分散，需适当集中；二是该区域尚未形成现代化农副产品生产基地，还不能适应特大城市的发展。

2. 人口密度与人口分布

根据上海市统计年鉴，2003 年上海市户籍人口总数为 1342 万人，外加流动人口近 500 万人，全市人口总数超过 1800 万人。如表 1-1 所示，全市平均人口密度近每平方公里 3000 人，其中人口密度最高的是静安区，人口密度在 4.2 万人/平方公里以上。黄浦、卢湾、徐汇、长宁、静安、普陀、闸北、虹口、杨浦等 9 个中心城区，其土地面积为 289 平方公里，占全市土地面积的 4.5%；人口总数 750 万人，占全市人口总数的 41%。换言之，将近 40% 的人口集中在仅占 4.5% 的行政区域范围之内。

表 1-1 2003 年上海市各行政区县土地面积和人口密度

地 区	土地面积 (平方公里)	户数 (万户)	年末户籍人 口(万人)	平均每户 人口(人)	人口密度(人 /平方公里)	外来人口 (万人)	年末人口总 数(万人)
全 市	6 340.50	486.06	1 341.77	2.8	2 116	498.79	1 840.56
浦东新区	522.75	65.23	176.69	2.7	3 380	102.34	279.03
黄浦区	12.41	21.00	61.87	2.9	49 854	10.01	71.88
卢湾区	8.05	11.68	32.84	2.8	40 793	5.12	37.96
徐汇区	54.76	31.95	88.61	2.8	16 181	20.50	109.11
长宁区	38.30	21.69	61.71	2.8	16 113	17.31	79.02
静安区	7.62	11.08	32.07	2.9	42 084	4.25	36.32
普陀区	54.83	30.81	84.53	2.7	15 417	23.36	107.89
闸北区	29.26	25.86	70.79	2.7	24 192	14.63	85.42
虹口区	23.48	28.61	79.22	2.8	33 741	14.74	93.96
杨浦区	60.73	37.99	108.17	2.8	17 812	20.34	128.51
宝山区	415.27	32.29	85.43	2.6	2 057	43.98	129.41
闵行区	371.68	28.32	75.12	2.7	2 021	73.38	148.50
嘉定区	458.80	17.27	51.18	3.0	1 115	40.01	91.19
金山区	586.05	17.36	52.71	3.0	899	7.52	60.23
松江区	604.71	16.77	50.68	3.0	838	32.55	83.23
青浦区	675.54	14.86	45.83	3.1	678	27.01	72.84
南汇区	687.66	27.66	69.91	2.5	1 017	16.56	86.47
奉贤区	687.39	20.53	50.87	2.5	740	19.77	70.64
崇明县	1 041.21	25.10	63.54	2.5	610	5.41	68.95

由图 1-1 可见，上海市户籍人口自上世纪 80 年代起逐步向非农人口转移，

到 2003 年全市户籍人口总数为 1342 万人 , 其中农业人口降低至 22% , 非农人口上升到 78%。

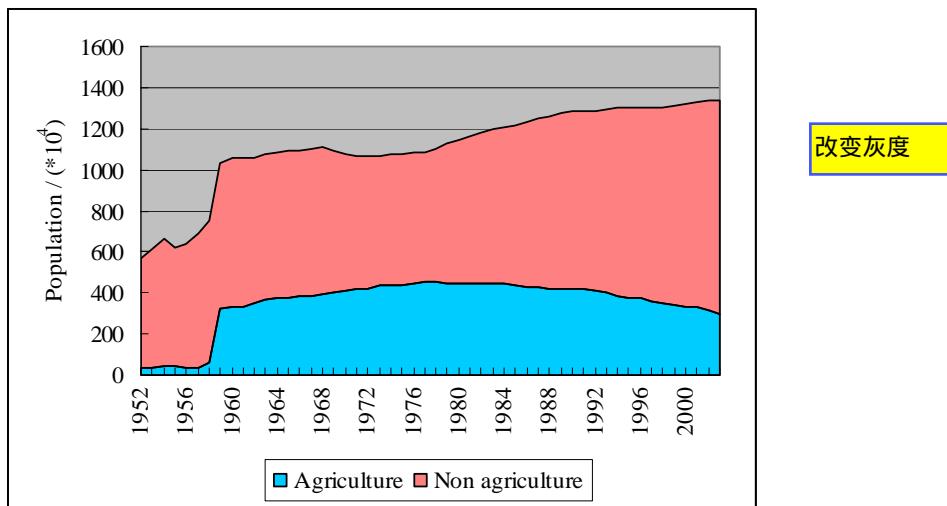


图 1-1 1952-2003 年上海市户籍人口组成

3. 国民经济发展状况

由图 1-2 所示 , 20 世纪 90 年代后 , 上海市国民经济持续快速增长。至 2003 年 , 全市国内生产总值增长率已经连续 12 年超过 10% 。 2003 年底 , 上海市国内生产总值达到 6250 亿元人民币 , 约 757 亿美元。按全市总人口计算 , 人均 GDP 超过 4000 美元。按户籍人口计算 , 全市人均 GDP 超过 5600 美元。

由图 1-3 可见 , 上海由以工业为主的城市逐步转向以工商贸易港口为主的中心城市。 2003 年 , 全市第一产业的国内生产总值占全市 GDP 的 1.5% , 二产占 50.1% , 第三产业占 48.4% 。经过 10 余年的产业结构调整 , 上海市目前已基本形成二、三产并驾齐驱的产业结构格局。随经济的不断发展 , 可以预计未来上海市第三产业的比重还将继续增加 , 工业亦将脱离原有的发展模式 , 逐步向高新技术领域发展。

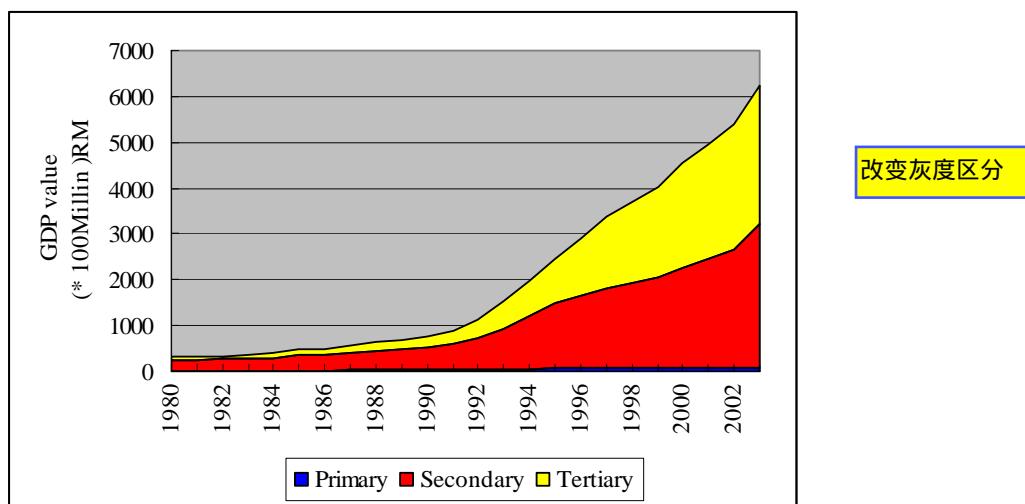
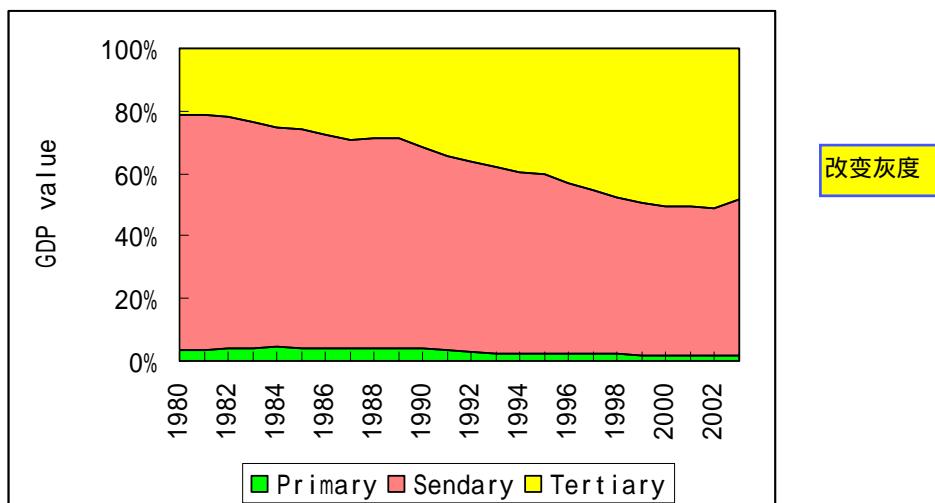


图 1-2 1980-2003 年上海市国内生产总值



改变灰度

图 1-3 1980-2003 年上海市产业结构变化

4. 劳动力与就业岗位

2003 年上海市在岗从业人员 813 万人，占全市总人口的 44%。其中从事农业生产的劳动力为 74 万人，占劳动力总数的 9%。二产 317 万人，占 39%。三产 422 万人，占 52%。从岗位部分看，制造业劳动力占 34%，批发和零售业占 14%，居民服务和其他服务业占 9%，其他行业均小于 5%。

表 1-2 2003 年上海市各行业从业人员（在岗从业人员）单位：万人

行业	从业人员	按登记注册类型分				
		国有	集体	其他	其中	
					# 城镇私营	# 港澳台及外商投资单位
总计	813.05	163.69	240.12	409.24	160.73	81.62
按产业分						
第一产业	73.72	1.07	71.92	0.73	0.29	0.02
第二产业	317.12	43.88	104.77	168.47	45.66	68.55
第三产业	422.21	118.74	63.43	240.04	114.78	13.05

5. 城市居民收入

据统计，2003 年全市职工年平均工资为 22160 元人民币（约 2686 美元），其中国有单位平均工资为 22541 元（约 2732 美元），集体单位平均工资为 9844 元（约 1193 美元），港澳台和外商投资单位的平均工资为 27976 元（约 3391 美元）。按可比价格计算，2003 年全市职工年平均工资是 1990 年的 2.5 倍。

6. 城市居民消费性支出

表 1-3 所示，1980 - 2003 年上海城市居民家庭可支配收入逐年提高。2003 年上海城市居民平均可支配收入达到 14867 元人民币（约 1802 美元），按可比价格计算，相当于 1980 年的 5 倍。城市居民消费支出也由 1980 年的 553 元，上升

到 11040 元 (约 1338 美元), 相当于 1980 年的 3.8 倍。

随着家庭和个人收入增加, 收入中用于食品方面的支出比例将逐渐减小, 按食品支出总额/家庭或个人消费支出总额, 即恩格尔系数计算, 并根据联合国粮农组织提出的标准, 恩格尔系数在 59%以上为贫困, 50-59%为温饱, 40-50%为小康, 30-40%为富裕, 低于 30%为最富裕进行划分, 上海城市居民总体生活水平从 1998 年开始进入小康, 见图 1-4。

表 1-3 上海城市居民可支配收入和消费支出

年份	平均每人可支配收入(元)	平均每人消费支出(元)	平均每人可支配收入指数(以 1980 年为 100)	平均每人消费支出指数(以 1980 年为 100)	恩格尔系数
1980	637	553	100	100	56.0
1985	1 075	992	140.72	149.53	52.10
1990	2 182	1 937	167.93	171.68	56.50
1995	7 172	5 868	254.60	239.97	53.40
2000	11 718	8 868	356.19	310.52	44.50
2001	12 883	9 336	391.61	326.90	43.40
2002	13 250	10 464	449.38	362.45	39.40
2003	14 867	11 040	497.76	384.27	37.20

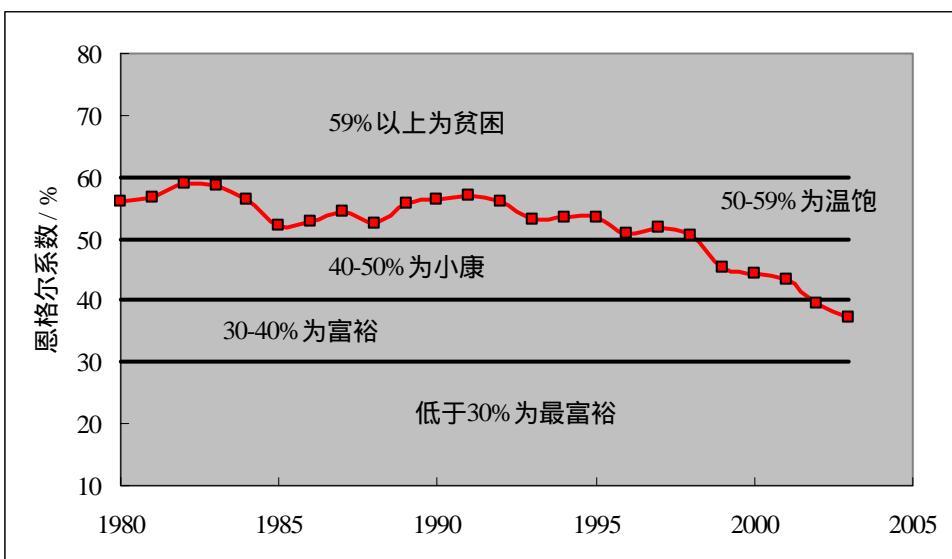


图 1 - 4 上海城市居民生活质量

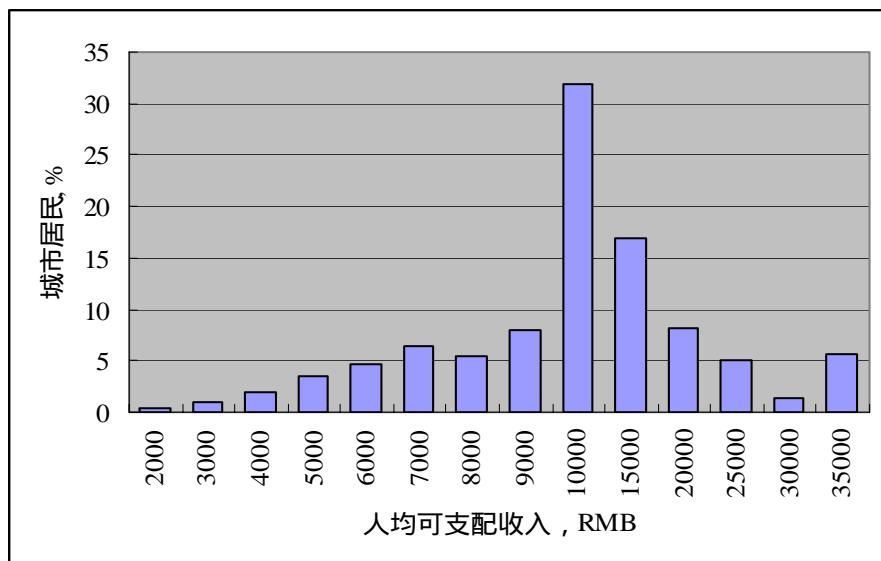


图 1-5 上海城市居民可支配收入分布

表 1-4 所示为上海农村居民收入和支出情况。由表可见，上海农村人均收入水平总体低于城市居民。2003 年上海农村人均收入为 7260 元人民币（约 880 美元），仅相当于城市居民的 48.8%。

然而应该看到，上海城市发展是不平衡的。统计资料显示，大约有超过 30% 的城市居民，其可支配收入少于 10000 元（约 1212 美元），35% 以上的城市居民其可支配收入超过 15000 元人民币（约 1818 美元），见图 1-5。

如果加上农业人口（农业人口约占全市人口的 22.4%），则全市可支配收入少于 10000 元的家庭约占全市总家庭户数（486.06 万户）的 45.7%。

表 1-4 上海市农村居民可支配收入和消费支出

年份	平均每人总收入 (元)	平均每人可支配收入 (元)	平均每人总支出 (元)	平均每人可支配收入指数 (1990=100)	平均每人生活消费支出指数 (1990=100)
1990	1990	1665	1592	100	100
1995	4861	4246	4041	255	267
2000	6400	5565	5578	336	328
2001	6827	5850	6353	351	377
2002	7080	6212	6988	373	421
2003	7260	6658	6931	400	449

7. 小结

第二章 城市交通环境状况

1. 经济发展与交通运输

城市的市内道路交通运输包括客运与货运两方面。客运交通（包括个体交通和公共交通）是上海市内旅客交通运输的主要承担者。过去 20 年间，随着上海市经济水平的快速发展，上海市日出行总量及出行率呈逐年上升趋势。在货物运输方面，尤其是进入 21 世纪上海交通量快速增长，统计资料显示，2000 年的道路年货运总量比 1986 增加了 4 倍多，见表 2-1。

表 2-1 上海市历年经济及人口发展、市内交通运输量与机动车保有量

年度	GDP* (亿元)	人口 (万人)	日出行总量** (百万乘次)	出行率*** (次)	年货运总量 (亿吨公里)	机动车保有量 (万辆)
1986	1144	1352	23.06	1.71	12.6	15.81
1995	2658	1463	28.38	1.94	9.3	41.99
1998	3727	1489	32.83	2.20	49.4	58.27
2000	4551	1522	35.00	2.30	56.4	103.77

* 2000 年价格

** 包括流动人口的出行

*** 以总人口数计

图 2-1 所示为 1986 年～2003 年上海市经济增长与道路年客货运总量以及机动车保有量的增长情况。由图可见，为满足交通运输量的增长，全市机动车保有量也呈现非常明显的增长趋势。

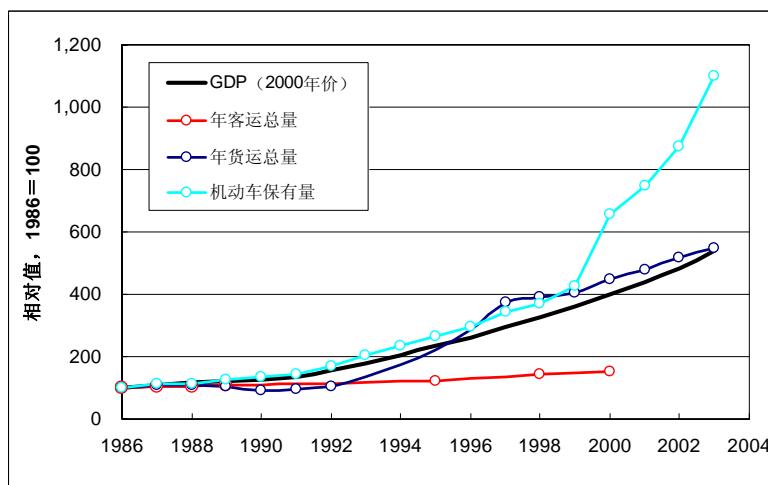


图 2-1 上海市 GDP 与交通运输和机动车保有量增长，1986-2003

1.1 经济发展与客运总量的变化

图 2-2 所示为上海市 GDP 与客运量之间的关系。由图可见，随着经济的增长，全市客运总量逐年升高，2000 年全市日出行总量由 1986 年的 23.06 万人次上升到 2000 年的 35 万人次，年均增长率约为 3%。客运量与 GDP 增长基本呈抛物线增长。

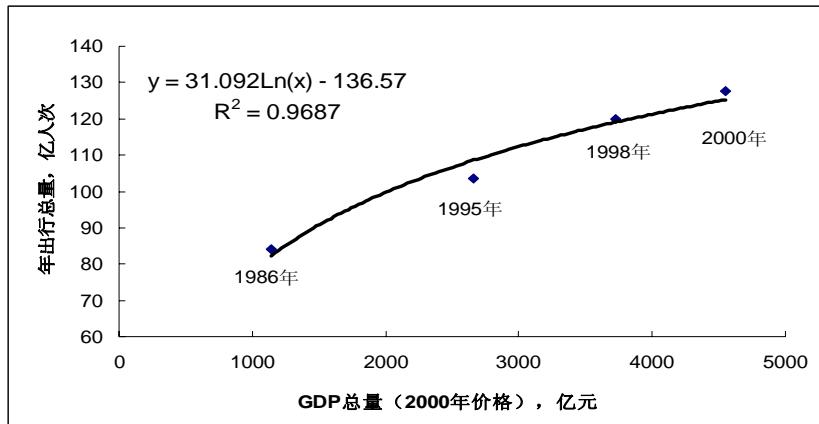


图 2-2 上海市 GDP 总量与年客运出行总量变化关系, 1986-2000

1.2 经济发展与货运总量

图 2-3 所示为 1986~2003 年上海市年货运总量与 GDP 增长的关系。由图可见，上海市货运量随 GDP 总量增长而逐年增加，其中以 1990~1995 年间增长最为迅速，近年来全市货运量逐渐趋于稳定，这与 90 年代中期上海市改革开放，大力吸引外资，开发开放浦东等一系列政策有关。总体上，1986 年后上海市道路货运量随 GDP 总量基本呈对数上升趋势，增长速度慢于经济发展，并逐渐趋于稳定。

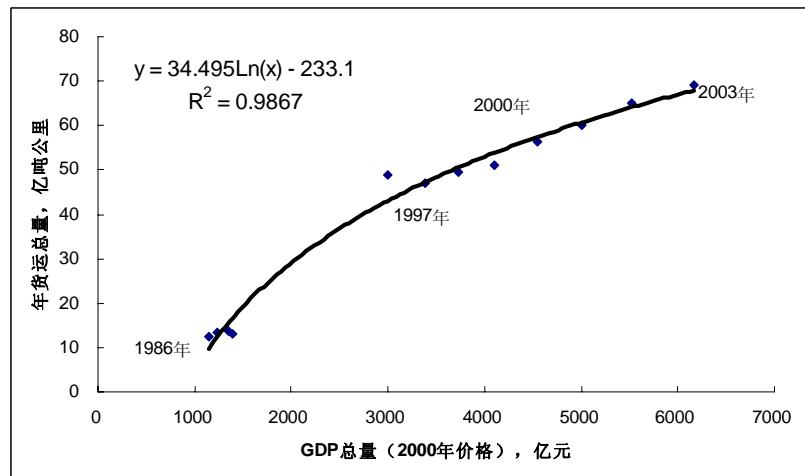


图 2-3 上海市 GDP 总量与道路年货物运输总量变化关系, 1986-2003

2. 城市道路交通条件

2.1 道路建设

为满足交通需求，自上世纪 90 年代中后期，上海市加大了城市交通建设力度，到 2004 年底全市已建成“申”字型高架路网。目前，中心城市建成全长 55 公里的“三横三纵”地面主干道，市区平均车速有较大提高。特别是进入新世纪后，上海加大了过江通道的建设力度，先后建设了复兴东路越江隧道、大连路越江隧道、外环线越江隧道、延安东路隧道复线、以及徐浦大桥、卢浦大桥等越江设施，极大地改善越

江通行能力，促进了城市东西向发展轴线的形成。城市外环线的建设，为城市发展并形成“由内向外”的格局创造条件。

到 2004 年底，上海轨道交通已经初具规模，全市建成了全长为 15.2 公里的地铁一号线（包括延长线），16.3 公里的地铁二号线，长度为 25.0 公里的轨道明珠线一期工程，长度为 17.0 公里的莘闵线，全市轨道交通通达里程 121.8 公里，表 2-2。

此外，上海加强了城市集聚与辐射功能，新改建公路 2117.01 公里，其中高等级公路增加两倍以上，沪宁、沪杭、嘉浏高速公路的建成，使上海通往外省市更加方便、快捷。

表 2-2 上海市历年来轨道交通通车里程 单位：km

	1 号线	2 号线	3 号线	5 号线	磁悬浮	轨道线路长度
1995	15.2					15.2
1997	21.0					21.0
2000	21.0	16.3	25.0			62.2
2003	21.0	16.3	25.0	17.0	30.0	109.2
2004	33.5	16.3	25.0	17.0	30.0	121.8

2.2 道路网络

目前，上海市道路网络由“三横三纵”与“三环十射”组成。其中，市中心“环加十字”的高架道路为其核心骨架，由内环线、南北高架和延安路高架组成，形似“申”字型高架道路系统。2003 年上海外环线全面贯通。2004 年中环线建设全面启动，该线将于 2007 年全线建成，届时“三环十射”快速路网长约 300 公里。中心城区建成“三横三纵”网格状地面交通格局，连成九段道路，彼此相通。上海市道路建设规划，到 2005 年，中心城干道总长达到 690 公里；中心区实现主干路机动车专用，次干路扩容；外围区重点加强放射型道路建设，提高路网密度，实现骨架路连网；郊区干线公路网总长达到 2304 公里，其中高速公路网总长达到 540 公里。

2.3 道路指标

根据 1991 年到 2003 年上海市统计资料，上海市人均道路长度和人均道路面积显著的增加。1991 年全市人均道路长度为 0.37 米，2002 年全市人均道路长度达到 0.76 米，是 1991 年的 2 倍。2002 年人均道路面积 11.46 平方米，是 1991 年的 2.5 倍，如图 2-4 所示。车均道路长度和车均道路面积的变化呈波浪起伏。如图 2-5 所示，当道路长度和面积大幅度增加的同时，机动车数量迅速增加，甚至增长速度快于道路面积的增长。从整体看，车均道路长度和面积值分别保持在 6.0- 9.1 m/车和 69.2-112.0 m²/车的范围内。但道路长度的增加速度和道路建设指标始终无法赶上机动车数量增长的速度。

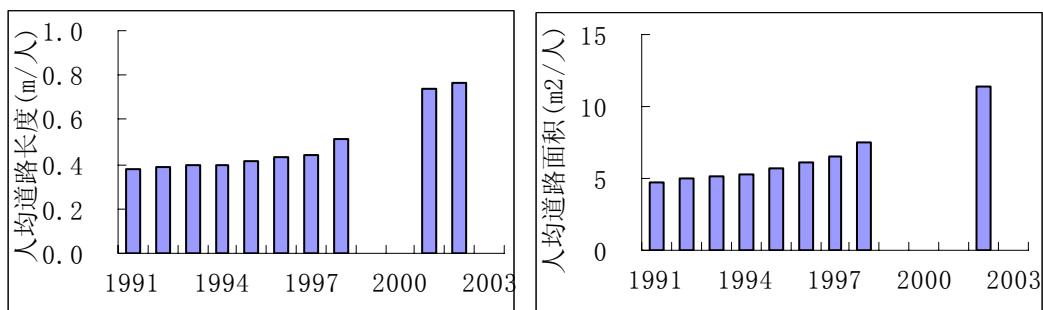


图 2-4 上海市人均道路长度和面积变化

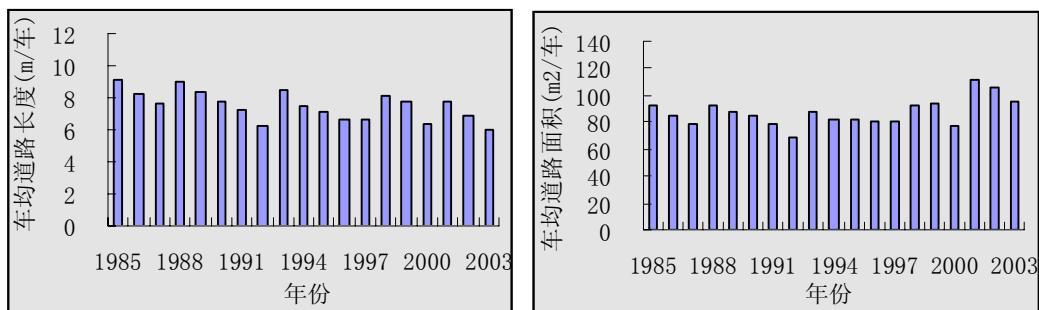


图 2-5 上海市车均道路长度和面积变化

2.4 城市公交线路长度

图 2-6 所示为 1996-2003 年上海市公交线路长度的变化。由图可见，2001 年之前，上海公交线路长度一直都在增长。尤其，1998 年比 1997 年增长了 4%，公交线路的长度得到迅速延长。而 2002 年，其公交线路长度为 22,005 公里，比 2001 年下降了 7%。2003 年线路长度基本与 2002 年相当，增长 105 km。

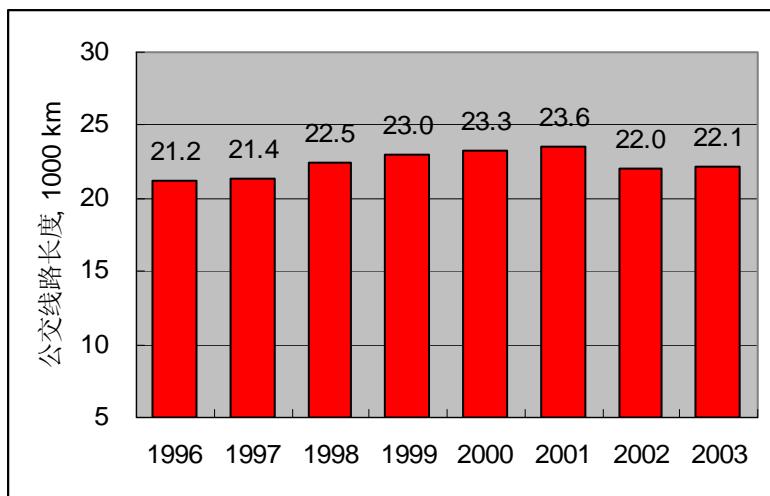


图 2-6 上海市历年公交线路长度

逻辑性？？

从公交线路长度的变化来看，拓展线路长度，可以增强城市交通可抵达性，目的是满足这一期间猛增的机动车保有量需求，但是最终没有缓解交通压力。2002 年，公交线路长度比上一年减少了 1,581 km。可见，一味的延伸公交线路长度并不是改

善交通环境的主导因素。适当的精简线路，进而优化组合，发展快速公交系统，采用不同交通方式分流，最终才能达到缓解交通压力的目标。

3. 机动车保有量与车辆组成

3.1 机动车保有量变化

如表 2-3 所示，随着经济的增长，上海市机动车保有量呈现快速增长趋势。特别是进入 2000 年以来机动车保有量的增长率明显高于人均 GDP 的增长速度。统计资料显示，1995 年全市人均 GDP 为 2476 美元，是 1990 年的 1.82 倍。同期机动车保有量是 1990 年 1.99 倍。到 2000 年人均 GDP 是 1995 年 1.68 倍，机动车是 1995 年的 2.47 倍。2003 年全市人均 GDP 达到 5618 美元，是 2000 年的 1.35 倍。而机动车保有量达到 1738 千辆，是 2000 年的 1.66 倍。

表 2-3 上海市机动车保有量变化

年份	人均 GDP USD/人(00 年价格)	机动车数量 千辆
1960	349	13
1965	251	15
1970	388	23
1975	533	52
1980	750	91
1985	1091	125
1990	1363	212
1995	2476	421
1996	2791	466
1997	3143	538
1998	3458	583
1999	3792	676
2000	4174	1043
2001	4581	1198
2002	5053	1390
2003	5618	1738

上海市机动车增长分为三个阶段，见图 2-7。第一阶段是人均 GDP 低于 1000 美元的阶段（~1984 年），在这个阶段，上海市社会经济活动水平较低，机动车保有量增长速度受制于计划经济，车辆拥有者主要是国有企事业单位和政府部门，机动车保有量发展相对较慢。第二阶段是人均 GDP 由 1000 美元向 4000 美元的过渡期（1985~1998 年），社会经济成分中出现了多元化的经济实体，机动车保有量的增长速度较第一阶段有小幅度增加。第三阶段是人均 GDP 超过 4000 美元的阶段（1999-2003），在这个阶段，人们的生活水平不断提高，上海市居民在基本解决住房问题后，购车需求逐年旺盛，2003 年在控制情况下每月私家车注册量达到 5000~6000 辆，全市机动车保有量显著快于第一和第二阶段。机动车在向人们提高交通便利的同时，正在成为城市环境空气质量的主导因素。

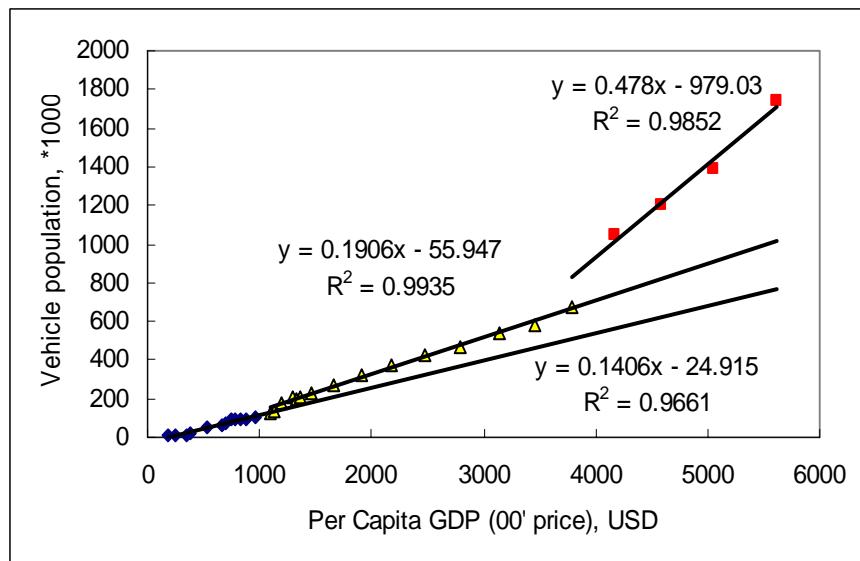


图 2-7 机动车保有量与人均 GDP 的关系 (1950~2003 年)

3.2 车辆组成

根据上海市公安局交警总队的统计资料，2002 年全市中型和重型车占全市机动车保有量的 9%，轻型车占 36%，摩托车占 54%，其他车辆（包括拖拉机、农用车、挂车、专用机械等）占 1%。1998~2002 年全市车辆组成变化见图 2-8。

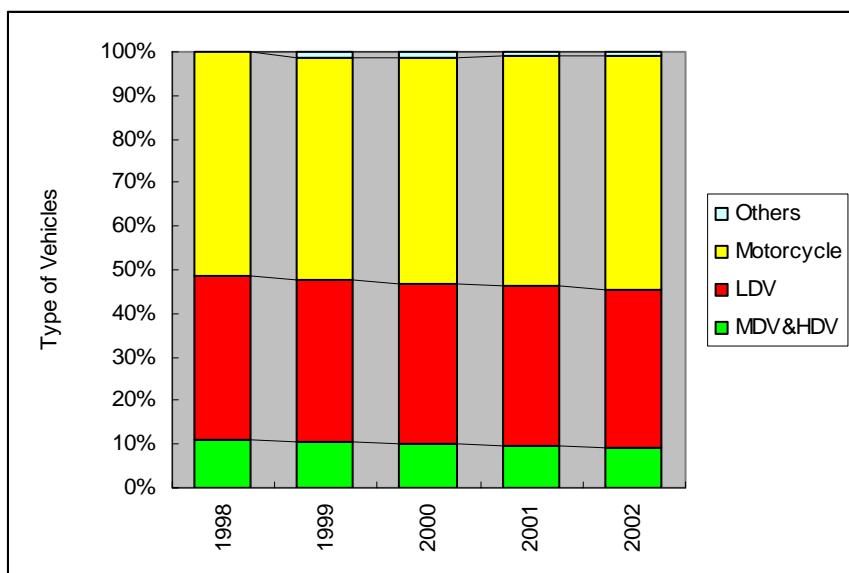


图 2-8 上海市车辆组成

4. 居民出行方式及运输量

图 2-9 所示为上海近年来交通出行方式的变化趋势。由图可见，20 世纪 80 年代，自行车、步行以及公交在城市交通总出行中占了很大的比重。进入 90 年代以后，政府为增强公交系统的市场竞争力，逐年减少了公交补贴，同时由于上海城市功能调整、城市和交通改造，以及城市居民逐步向外围转移等多方面原因，使得公共交通难以满足日益增长的居民出行需求，全市居民出行方式逐步导向私人化的交通方式。1995 年居民出行方式逐步由步行和自行车转向助动车，公共交通的出行比重逐

步降低。随着城市居民生活水平和收入的提高，以及公交系统的完善，上海城市居民的出行方式逐步由步行、自行车和助动车等非机动车方式，转向公共交通和其他机动车化方式，到 2000 年城市居民以公交和汽车为出行方式的比重占 54%，以非机动车化出行方式的比重降低至 34%（包括步行、自行车+助动车）。从增长趋势来看汽车与公交出行的增长相对较快，这也是城市机动车化的必然进程，也预示着上海市未来交通发展的方向。

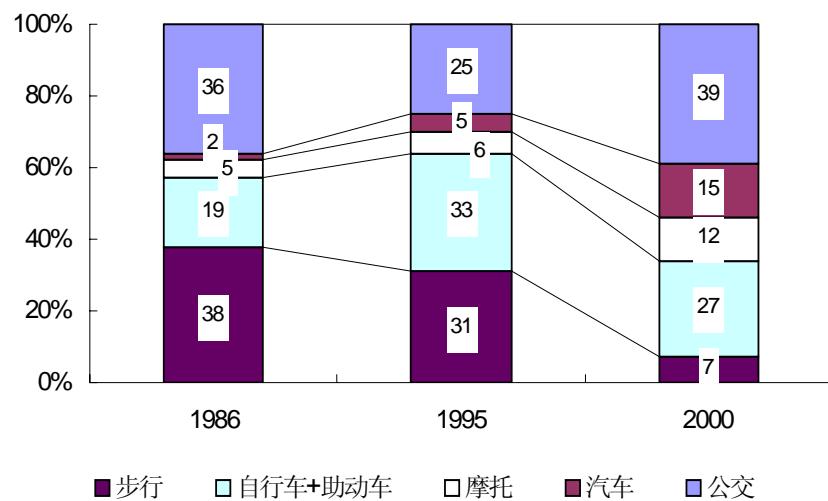


图 2-9 上海市居民出行方式的变化, 1986-2000

4.1 公交车

表 2-4 所示为上海市公交的主要指标。由表可见, 2003 年上海市公交线路共 952 条, 公交线路总长 22,110 公里。公交车辆比 2002 年略有增加, 达到 18,625 辆。公交车客运总量不升反降, 由 2002 年的 27.75 亿人次下降到 27.31 亿人次。这种现象说明, 随着上海市经济水平的发展和人民生活水平的提高, 公共交通的吸引力已逐渐被小汽车和摩托车等便利程度更高的私人交通工具取代。全市现有的公交体系已趋于稳定, 尚未有新的突破, 或者说尚未找到新的发展方向。

表 2-4 上海市公交线路主要指标, 1996-2002

	单位	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
公交线路长度	公里	45,840*	51,220*	53,901*	23,007	23,260	23,586	22,005	22,110
公交线路条数	条	1,058	1,078	1,098	976	978	991	951	952
运营车辆数	辆	13,323	14,207	15,282	16,661	17,939	18,083	18,541	18,625
客运总量	亿人次	23.07	23.78	24.88	24.20	26.49	26.84	27.75	27.31

* 包括长途运输线路。

4.2 出租车

与公交车相比, 出租车没有庞大的客运量, 但作为公交车的补充, 出租车解决

了居民便捷、高效的出行需求。表 2-5 给出了上海市出租车的运行指标。2003 年上海市拥有出租车 48,672 辆。比 2002 年增长 1,163 辆。运营里程由 2002 年的 51.37 亿公里上升到 56.45 亿公里。根据上海市综合交通规划所的统计，2002 年出租车日客运量达到 245 万乘次，比 2001 年提高了 18.7%，平均每车载客里程 6.3 公里，载客以中、短距离出行为主。总体上看，上海市出租车运行呈现处稳中有升的态势，特别是客运量变化较快。从另一个侧面也说明了上海市公共交通体系尚未完善，大容量公共交通的服务还有改善余地。

表 2-5 上海市出租车运行指标，1996-2002

	单位	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
运营车辆数	辆	38,554	40,977	41,183	42,056	42,943	46,921	47,509	48,672
载客车次	万次	18,613	22,387	27,368	31,109	37,599	36,784	44,092	49,729
运营里程	亿公里	27.43	29.67	35.94	40.05	46.48	46.07	51.37	56.45

4.3 轨道交通

近年来，为改善交通状况，上海市政府在轨道交通的建设和运营上投入了巨大的精力。2003 年轨道线路总长已达 109 公里，比 2002 年增长了 45.73 公里，主要是增添了 17.0 公里的莘闵线和 30 公里的磁悬浮。2004 年，随着地铁 1 号线延伸段（上海火车站至通河新村站）的开通，全市轨道交通线路总长达到 121.8 公里。2003 年轨道交通客运量达到 4.06 亿人次，比 2002 年增长了 13.6%。可见，轨道交通在上海市公共交通体系中的地位正日益提高，从其高效、快速、清洁等特点来看，轨道交通的发展是上海市交通走可持续之路的有利讯号。

表 2-6 上海市轨道交通日承担客运量，1996-2002

	单位	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
运营车辆	节	96	96	96	96	216	216	330	445
运营线路长度	公里	15.21	20.06	20.06	20.06	62.92	62.92	62.92	109.2
行驶里程	万列·公里	128.7	175.8	211.5	223.9	324.6	539.0	633.3	813.2
客运总量	亿人次	0.89	1.12	1.26	1.09	1.36	2.83	3.57	4.06

4.4 私人交通

私人交通承担的工具主要为私人轻型客车、摩托车、轻便摩托车和助动车。2003 年，私人轻型客车保有量 22.1 万辆，单车日平均行驶里程为 49 公里，客运总量在 4.85 亿乘次左右。摩托车与轻摩总量约为 98 万辆，日平均行驶里程为 12 公里，客运总量达到 8.98 亿乘次左右。注册登记的助动车在上海约有 35 万辆，日平均行驶里程为 12 公里，客运总量达到 3.8 亿乘次左右。由表 2-7 可见，上海市私人交通的增长十分快速，与公共交通的相对稳定相对应，全市居民的出行方式正逐步导向私人化的交通方式。虽然这种现象是城市机动车化的必然进程，但私人车辆增长过快对于土地资源有限、人口稠密的上海而言无疑是一个严峻的挑战，如何有序发展私

人交通，将是上海交通可持续发展的重要课题。

表 2-7 上海市私人交通车辆数及客运量变化，1996-2002

		单位	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
私人轻型客 车	车辆数	万辆	0.81	0.86	1.97	3.09	4.20	8.10	14.0	22.1
	客运量	亿乘次	0.18	0.19	0.43	0.68	0.92	1.77	3.07	4.85
摩托+轻摩	车辆数	万辆	15	41	45	49	54	64	76	98
	客运量	亿乘次	1.35	3.75	4.13	4.51	4.89	5.81	6.92	8.98
助动车	车辆数	万辆	47.8	49.0	48.0	42.5	37.0	37.4	36.4	35
	客运量	亿乘次	5.2	5.4	5.3	4.7	4.1	4.1	4.0	3.83

4.5 公务车

公务车指公司或单位用车。上世纪 90 年代由于上海城市经济蓬勃发展，由各公司或政府部门所有的公务车在轻型客车里占据了很大比重，但与私人小汽车相比，由于各企业及政府部门对公务车的需求已经相对稳定，每年增长不大。2003 年公务车总量约为 27 万辆，客运量在 6 亿乘次左右。

表 2-8 上海市公务车车辆数及客运量变化，1996-2002

		单位	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
公务车	车辆数	万辆	12.6	15.2	16.2	18.1	20.2	22.4	23.1	27.0
	客运量	亿乘次	2.76	3.34	3.55	3.97	4.42	4.91	5.06	5.91

4.6 自行车

自行车一直是上海市交通出行的重要方式之一。至 2002 年末，全市拥有自行车 764 万辆，总承担的出行 66.9 亿乘次左右。表 2-9 为历年自行车承担的出行量的变化。

表 2-9 上海市自行车车辆数及客运量变化，1996-2002

		单位	1996	1997	1998	1999	2000	2002
自行车	车辆数	万辆	589	175	332	500	660	764
	客运量	亿乘次	51.6	15.3	29.1	43.8	57.8	66.9

5. 交通饱和状况

上世纪 90 年代初，上海市加快了城市道路建设，城市道路交通设施发展进入快速增长阶段，道路交通各项指标得到明显改善。然而，由于交通需求测的速度远大于交通供应测的供给能力，所以自 2004 年起上海市的交通环境正面临新的和更大的压力。

以交通通行能力的重要指标，即道路宽度来考察。全市道路宽度的变化分为三个阶段（见图 2-10）。第一阶段（1991~1997 年），全市道路逐年加宽，全市道路交

通通行能力逐年提高。第二阶段（1998~2000 年），上海全市道路建设力度趋缓，而在该时期机动车保有量迅速逐步加大，使得道路的相对通行能力开始减弱，上海开始出现新一轮交通拥堵，但尚未引起足够重视。第三阶段（2001 年~），特别是 2003 年和 2004 年机动车保有量出现大幅增长，为满足交通增长需求，上海继续加强道路建设力度，道路宽度继续加宽。然而，部分道路加宽是以牺牲非机动车道为代价的。从表观数据上看，2001~2004 年全市车行道路面积在不断加宽，但是正是由于非机动车变窄这一因素，使得道路交通趋于恶化。

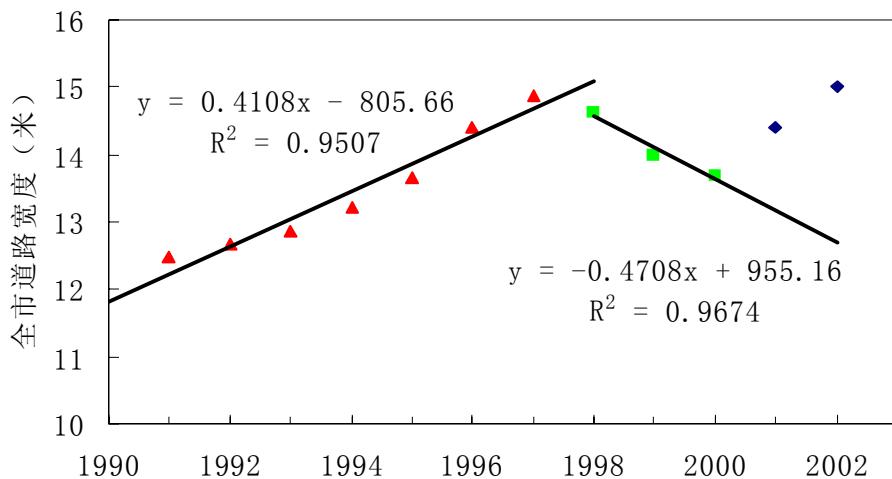


图 2-10 上海市道路宽度变化

此外，根据上海市公安交警总队的统计资料，选择了市区内几个调查点，对不同年份的高峰小时流量做比较，见图 2-11。

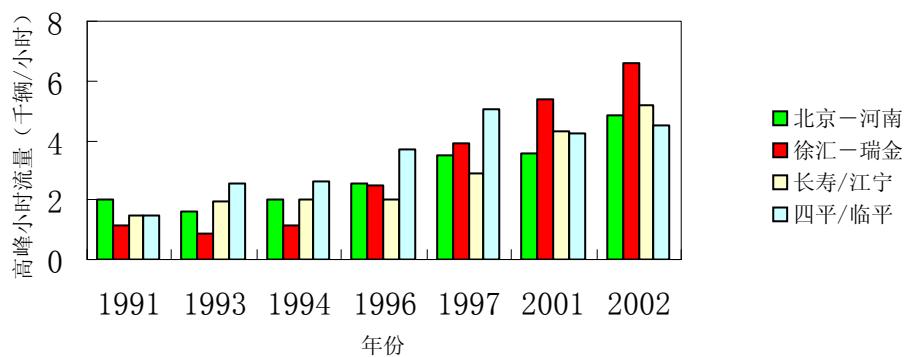


图 2-11 上海市区主要调查点高峰小时流量

这几个点分别在黄浦、卢湾、普陀、虹口，其中北京一河南、徐汇一瑞金路段在 1991~1993 年间高峰小时流量有所减弱，从 1994 年起却迅速的增长。对于长寿/江宁段的高峰小时流量一直都在增长。对于四平/临平，从 1991~1997 年都稳步的

增加，但 2001、2002 年的资料显示高峰小时流量有所回落。但从总体讲，随着时间的推移，市区主要调查点的高峰小时流量是呈上升趋势的，可见交通流量一直持续上升，这与全市机动车保有量迅速增加的事实相一致。

从目前上海交通环境状况看，上海市出行总量仍呈上升趋势。高架道路自 4 月份以来，白天流量呈增长趋势，大部分路段全天饱和；内环线高架东北环（杨浦大桥到大柏树）的交通运行状况较好，而广中路至西藏北路则是交通最为拥堵的路段，其它路段的交通运行状况也较为紧张。南北高架的拥堵断面主要出现在延安路立交附近。东西高架在中段贯通后，流量迅速增长并趋于饱和，流量最高断面则出现在中段的铜仁路附近。越江交通，除大连路、复兴路隧道外，流量均已达到或超过设计流量。越江交通量在一定程度上反映了中心区东西向交通的运行状况。2001 年全年日平均越江量为 370923 车次。比 2000 年增长了 30%。由于越江交通量的迅速增长，中心区两桥两隧承担了较大的交通压力。中心区南北向大部分交通流量由成都路（包括南北高架）、中山西路（包括内环高架）、东纵干道（外白渡桥及吴淞路闸桥、中山东一路）和西纵干道（曹杨路、武宁路、江苏路）四个主通道承担。公交运能虽有所增加，但仍不能满足客流增长需求。2004 年前 9 个月，本市公交客流全面增长，日均出行达 1205 万人次，同比增长 8.47%。在公交日均出行客流中，轨道交通约 128 万人次，地面公交约 772 万人次，出租汽车约 305 万人次。上海市域范围内的沪宁、沪杭和沪嘉三条高速公路，承担的交通流量各占三分之一，全年共承担 2500 万车次左右，日均承担车次均在 2-3 万辆之间。下半年车流量略大于上半年，日均交通流量季节性变化不明显，1-2 月相对低谷，最高值出现在 11 月。目前高峰时段公交超负荷运行现象十分严重，上海市大部分道路基本上全天候饱和。

6. 交通安全现状

根据上海市公安局交警总队的统计资料，2002 年全市的交通事故总数为 47088 起，其中汽车（包括重型车、轻型车等）占 85%，摩托车占 5%，其他车辆（包括拖拉机等）占 1%，非机动车占 6%，而行人以及乘车人占 3%。

表 2-11 和图 2-12 所示是 1990~2002 年交通事故受伤和死亡人数与机动车保有量的关系。由图可见，随着车辆总数的增加，全市交通伤亡总数也在逐年上升。但是由于本市加强了交通管理，使得全市交通事故率（即，伤亡人数与车辆之比）逐年降低。图 2-12 显示，近年来上海市交通事故率基本保持在 12 人/千辆车左右，其中受伤人数占 11 人/千辆车，死亡人数为 1 人/千辆。

表 2-11 主要年份交通事故与车辆保有量的变化

时间	车辆数(千辆)	交通次数(百次)	死亡人数(人)	受伤人数(十人)
1990	212	76	608	471
1991	229	75	594	445
1992	266	45	591	357
1993	321	81	699	288

1994	372	126	722	331
1995	420	167	788	377
1996	466	201	783	438
1997	538	216	781	583
2002	1390	471	1400	1569

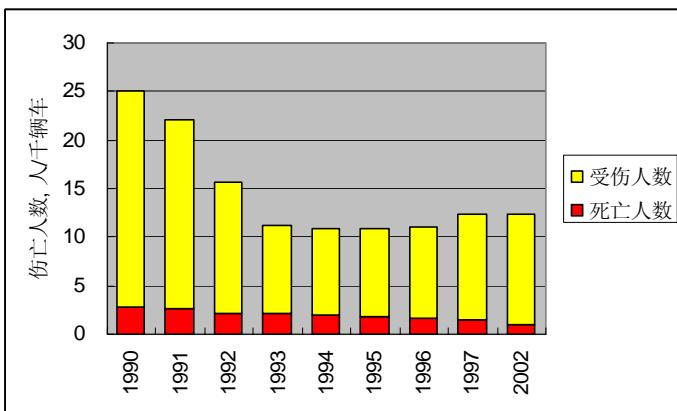


图 2-12 1990~2002 年上海市交通伤亡人数

在所有的交通事故中，以中小交通事故为主，重大事故占的比重相对减小。此类事故中大多是由于机非混和、违章等因素造成，给交通排堵带来阻碍。

7. 停车场分布

根据上海市公安交警总队的统计资料，比较了 1991、1994、1997、2002 年道路停车点的情况，见图 2-13。从 1991~1997 年，道路停车点的停车点、泊位以及面积逐年得到扩大。然而，2002 年的数据表明道路停车点的停车点、泊位以及面积都有一定的缩减，回落到 1994 年的水平。

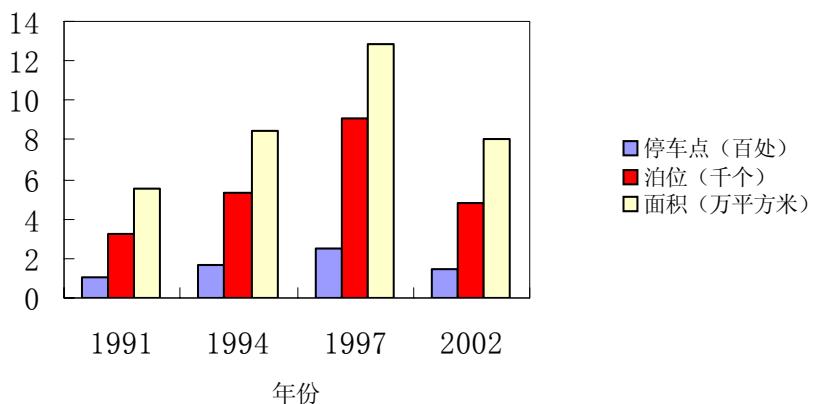


图 2-13 主要年份的道路停车点情况

此外，到 2003 年底，本市已拥有机动车辆 150 万辆，其中汽车 80 万辆，摩托车 70 万辆。现有停车总泊位约 49 万个，其中路外公共停车泊位 12.3 万个，道路停车泊位约 4300 个。其中，经营性停车场泊位数为 10.8 万个，停车场面积为 424 万平方米，其中内环内 211.6 万平方米，内外环间 133.4 万平方米，外环外 79 万平方

米。见表 2-12。公共停车泊位与机动车拥有量（摩托车按 0.5 辆汽车计算）之比为 10.7%，基本停车泊位与机动车拥有量之比为 60% 左右。

比照国外大城市经验，公共停车泊位与机动车拥有量之比要达到 15%—20%，基本停车泊位与机动车拥有量之比基本为 100%，才能缓解城市“停车难”问题。上海的机动车每年以 7 万辆速度增加，到 2010 年，机动车拥有量将达到 200 万辆，公共停车泊位按 15% 比例计算，需增加 12 万个；如果按一车一位的基本泊位计算差距更大。（http://www.sh.xinhuanet.com/2004-06/25/content_2377587.htm）

由于停车场地缺乏、分布不合理，机动车停放困难，大多选择占道停车。一旦道路被占，原本不宽畅的道路更加拥挤，非机动车穿插在机动车道上，这样造成恶性循环，给道路的通畅带来更大考验。

表 2-12 2003 年全市经营性停车场库设施

类别 区域	停车位 (个)				停车面积 (万平方米)
	大型	小型	中型	合计	
内环内	828	54022	661	55511	211.6
内外环间	8029	24638	1279	33946	133.4
外环外	5287	11184	1895	18366	79
合计	14144	89844	3835	107823	424

8. 小结

在过去 20 年间，上海市经济快速增长，随之而来的，便是机动车保有量、道路建设及交通运输量的增长。至 2003 年底，人均 GDP 达到 5618 美元/人，机动车保有量 173.8 万辆，全市道路（包括城市道路和公路）总长达到了 10451 公里，较上一年增长了 260 公里；道路面积达到了 16510 万平方米，其中车行道面积 12631 万平方米。全市交通运输量亦随着经济的增长而呈现上升趋势。

目前全市大约 37% 的机动车交通量集中在中心城区，而中心区交通总容量大约仅占全市路网容量的 18%。由于机动车的出行大量集中在浦西中心区的范围之内，而浦西中心区提供的道路容量又相当有限，因此这一区域的交通运行状况已经相当紧张，交通堵塞现象时有发生。目前高峰时段公交超负荷运行现象十分严重，上海市大部分道路基本上全天候饱和。

城市停车问题的解决是实施城市畅通工程的一个重要组成部分。布局规划合理的停车场不仅可以缓解交通压力、减轻城市中心污染，更可以提高城市居民生活质量、优化城市环境，使城市得到可持续发展。目前，上海市停车场面积为 424 万平方米，比上一年增长了 73 万平方米，但是仍旧不能满足日益增长的停车需求。

第三章 城市交通运行工况测试和机动车技术调查

1. 前言

目标是什么- 排放因子？

机动车的排放状况与车辆在道路上的行驶状态，如速度、加速度、怠速比以及时间 - 速度、速度 - 加速度分布等工况特性有着密切关系。当车辆经常处于急加速的恶劣工况下，车辆的排放趋于恶化，当车辆运行工况比较平稳时，车辆的排放相对比较稳定。因此车辆的行驶工况不仅反映了车辆在道路上的实际运行条件，决定了机动车的排放状况，同时也是城市道路交通管理水平的具体体现。

除车辆运行工况外，影响机动车排放最重要的参数是机动车本身所具备的技术，如发动机类型、车龄、空调使用情况、燃油/空气控制系统采用的技术、尾气控制技术等。

为全面了解机动车排放状况，本项目在过去研究的基础上，考虑到机动车行驶工况和车辆技术对机动车排放的影响，采用由加州大学 Riverside 分校、工程学院—环境研究与技术中心（CE-CERT）全球可持续体系研究组织（GSSR）和国际可持续研究中心（ISSRC）共同开发的，国际机动车排放模型，即 IVERM（International Vehicle Emission Model），作为本研究的机动车排放清单的基础排放模型。

该模型的优点是可以根据详细的信息收集和相对简单的调查试验以及排放测试得到建模所需的三个关键文件，即机动车行驶工况文件、技术分类文件和污染物排放校正因子文件，从而建立适用于上海的机动车排放模型。目前，该模型已在洛杉矶、圣地亚哥、墨西哥城等大中城市得到应用。

为获得机动车行驶工况资料，本研究采用全球定位系统(Global Position System) 逐秒记录不同类型机动车的速度、经纬度和海拔高度等信息。测试在 9 条线路上进行，包括 7:00-21:00 各小时的运行工况。采集了上海市全天、具有代表性道路上、主要类型车辆的运行速度和加速度的逐秒信息。利用机动车启动状况记录设备(Vehicle Operating Characteristics Enunciator)记录机动车发动机开启和关闭的信息，从而收集上海市机动车启动次数、运行和熄火时间分布。同时，开展机动车技术调查，以建立技术分类文件。

2. 测试地点和道路的选择

为了使采集的数据能够代表上海市交通状况，本研究分别选取了普陀区、徐汇区和黄浦区进行机动车行驶工况和车辆技术调查，这三个区域分别代表了上海市的相对低收入区、相对高收入区和商业中心区。在每个区域里分别选取三种典型的道路，分别代表城市快速干道（红色线路）主干道（蓝色线路）和次干道（绿色线路）。具体区域和道路如图 3-1 和表 3-1 所示。



图 3-1 上海市机动车调查区域和道路

表 3-1 上海市机动车行驶工况调查道路

道路	位置
快速干道 A1	外环线——普陀区
快速干道 B1	延安东路——黄浦区
快速干道 C1	中山南二路——徐汇区
主干道 A2	真南路——普陀区
主干道 B2	南宁路——虹口区
主干道 C2	淮海路——徐汇区
次干道 A3	茅台路——普陀区
次干道 B3	中华路——黄浦区
次干道 C3	田林路——徐汇区

3. 调查方法

3.1 车辆行驶工况调查

本次车辆行驶工况调查共使用 GPS10 台。不同的机动车类型在行驶路段的选择和驾驶行为的操作方面都有较大不同 ,为了能够全面的反映上海市各种类型机动车的行驶工况 ,分别选取了乘用车、公交车、卡车、出租车和摩托车进行试验。

在三辆乘用车上分别装设 1 台 GPS ,乘用车按图 3-1 所示线路分别在 A、B、C 区的三种道路上跟车流行驶 40 分钟左右 ,在下一个小时开始时换到第二条路段 ,依次轮流。具体行驶路线和时间安排如表 3-2~表 3-7 所示 (表中 A、B、C 分别表示普陀区、黄浦区和徐汇区 ;字母后面的数字 1、2、3 分别表示快速干道、主干道和次干道)。试验时间为每天 7 个小时 ,覆盖 7:00 - 21:00 各个时段 ,历时 6 天。

表 3-2 第一天测试安排(04 年 6 月 10 日)

时间	车 1	车 2	车 3
07:00-08:00	A-1	B-1	C-1
08:00-09:00	A-2	B-2	C-2
09:00-10:00	A-3	B-3	C-3
10:00-11:00	A-1	B-1	C-1
11:00-12:00	A-2	B-2	C-2
12:00-13:00	A-3	B-3	C-3
13:00-14:00	A-1	B-1	C-1

表 3-3 第二天测试安排(04 年 6 月 10 日)

时间	车 1	车 2	车 3
07:00-08:00	C-2	A-2	B-2
08:00-09:00	C-3	A-3	B-3
09:00-10:00	C-1	A-1	B-1
10:00-11:00	C-2	A-2	B-2
11:00-12:00	C-3	A-3	B-3
12:00-13:00	C-1	A-1	B-1
13:00-14:00	C-2	A-2	B-2

表 3-4 第三天测试安排(2004 年 6 月 11)

时间	车 1	车 2	车 3
14:00-15:00	A-1	B-1	C-1
15:00-16:00	A-2	B-2	C-2
16:00-17:00	A-3	B-3	C-3
17:00-18:00	A-1	B-1	C-1
18:00-19:00	A-2	B-2	C-2
19:00-20:00	A-3	B-3	C-3
20:00-21:00	A-1	B-1	C-1

表 3-5 第四天测试安排(04 年 6 月 14 日)

时间	车 1	车 2	车 3
07:00-08:00	B-3	C-3	A-3
08:00-09:00	B-1	C-1	A-1
09:00-10:00	B-2	C-2	A-2
10:00-11:00	B-3	C-3	A-3
11:00-12:00	B-1	C-1	A-1
12:00-13:00	B-2	C-2	A-2
13:00-14:00	B-3	C-3	A-3

表 3-6 第五天测试安排(04 年 6 月 15 日)

时间	车 1	车 2	车 3
14:00-15:00	C-2	A-2	B-2
15:00-16:00	C-3	A-3	B-3
16:00-17:00	C-1	A-1	B-1
17:00-18:00	C-2	A-2	B-2
18:00-19:00	C-3	A-3	B-3
19:00-20:00	C-1	A-1	B-1
20:00-21:00	C-2	A-2	B-2

表 3-7 第六天测试安排(04 年 6 月 16 日)

时间	车 1	车 2	车 3
14:00-15:00	B-3	C-3	A-3
15:00-16:00	B-1	C-1	A-1
16:00-17:00	B-2	C-2	A-2
17:00-18:00	B-3	C-3	A-3
18:00-19:00	B-1	C-1	A-1
19:00-20:00	B-2	C-2	A-2
20:00-21:00	B-3	C-3	A-3

公交车、卡车、出租车和摩托车的行驶工况与其运营特性有关，比如公交车一般在车流量较大的城市中心主干道上运行，并且在乘客上、下车时产生频繁的加减速和怠速；而上海市卡车运行大多在车速较快的外环线快速干道上运行。由此，分别装设 2 台 GPS 用于公交车、卡车和出租车，1 台用于摩托车上（采集公交车数据时，由 2 名试验人员分别携带 1 台 GPS 各自乘坐公交车，并适时换乘），测试车辆按正常运营状态行驶，时间尽量覆盖 7:00 - 21:00，共 6 天。这样便可获得上海市各种车辆类型在正常运营状态下在各区域的行驶工况。

3.2 车辆技术调查

为了解上海市机动车辆技术，采取停车场调查的方法对机动车进行详细的技
术分类。停车场调查的主要对象是乘用车，这些车辆的出行正是上海市道路交通

的主要承担者，真实反映了上海市道路上所运行车辆的运行水平。为使调查车辆更能代表上海市各个区域的车辆技术，分别在图 3-1 中的 A、B、C 三个区域附近挑选停车场，共调查车辆 1200 余辆。考虑到出租、公交巴士以及货车等很难在停车场进行调查，这些车辆的技术分类分别在出租车公司、公交公司和货运公司调查获得。

根据车辆的特性及其对排放的影响，对停车场技术调查内容主要作以下分类，见表 3-8。

表 3-8 停车场车辆技术调查主要分类

燃油类型	发动机尺寸	燃料 - 空气系统	排放控制装置	空调
Pt - 汽油	以气缸容积(升)计	4C - 四冲程化油器	No - 无催化器	有
D - 柴油		2C - 二冲程化油器	2W - 氧化型	无
L - LPG		SI - 单点燃油喷射	3W - 三元催化	
		MI - 多点燃油喷射	Euro	
		PI - 预喷(柴油车)	Euro	
		DI - 直喷(柴油车)	Euro	
		MX - 天然气或丙烷混合燃烧	Euro	

3.3 车流量及车流比例调查

为确定上海市各代表性区域，各代表性路段的车流量以及各种类型机动车在道路上的分布，分别在图 3-1 选定区域中的各条路段上分别设置摄像点（即有“ ”标志的地点），记录各路段上各时段的车流量和车流比例，各点拍摄 20 分钟左右。为便于拍摄，摄像点均安排在道路旁或者过街天桥上，本次调查共使用两台摄像机，其中一台用来记录车流量和车型，另一台用来记录车牌号（以便向相关部门了解车辆的技术等详细情况）。摄像记录的具体时间和地点安排如表 3-9 所示。

表 3-9 摄像时间和地点安排

道路类型	地点	日期/时间
A : 快速干道	北翟路过街天桥（外环）	Wed, Jun 9 @ 07:00, 10:00, 13:00 Fri, Jun 11 @ 14:00, 17:00, 20:00
B : 快速干道	延安东路	Mon, Jun 14 @ 08:00, 11:00 Wed, Jun 16 @ 15:00, 18:00
C : 快速干道	徐汇教育学院 7 楼	Thu, Jun 10 @ 09:00, 12:00 Tue, Jun 15 @ 16:00, 19:00
A : 主干道	交通路过街天桥	Wed, Jun 9 @ 08:00, 11:00 Fri, Jun 11 @ 15:00, 18:00
B : 主干道	河南路与海宁路过街天桥	Mon, Jun 14 @ 09:00, 12:00 Wed, Jun 16 @ 16:00, 19:00
C : 主干道	赵家浜路和瑞金路过街天桥	Thu, Jun 10 @ 07:00, 10:00, 13:00 Tue, Jun 15 @ 14:00, 17:00, 20:00
A : 次干道	茅台路和古北路交叉口	Wed, Jun 9 @ 09:00, 12:00 Fri, Jun 11 @ 16:00, 19:00
B : 次干道	河南路和中华路交叉口	Mon, Jun 14 @ 07:00, 10:00, 13:00 Wed, Jun 16 @ 14:00, 17:00, 20:00
C : 次干道	田林东路	Thu, Jun 10 @ 08:00, 11:00 Tue, Jun 15 @ 15:00, 18:00

拍摄结束，通过读带器和计数器等设备完成车流量和车流分布的统计。本研究将机动车类型分为：轿车、出租车、摩托车、助动车、大巴、中巴、小巴、大卡车、中卡车、小卡车及其他。

3.4 车辆启动分布调查

车辆启动时，由于空气燃料混合条件较差，尾气排放往往比较恶劣。特别在冷启动状态下，由于发动机没有预热，装有催化器的车辆在温度较低的条件下没有催化效果，使车辆的排放格外严重。为了了解上海市车辆在启动时的排放状况，本次调查利用机动车启动状况记录设备 VOCE 记录下各车辆的启动时间分布以及从停车到下一次启动时的停滞时间分布。共记录车辆 70 辆，各车辆记录 7 天。

4. 调查和测试设备

机动车行驶工况调查所用的仪器设备如表 3-10 所示：

表 3-10 机动车行驶工况调查所用设备

序号	设备名称	规格型号	数量	产地	备注
1	GPS		10 台	美国	记录逐秒速度等工况
2	摄像机	SONY DCR-PC110	2 台	日本	纪录车流量及车牌号
3	读带机	SONY GV-D100	2 台	日本	读取摄像机磁带
4	笔记本电脑	SONY	2 台	日本	读取 GPS 中的数据
5	VOCE		70 只	美国	记录机动车启动情况
6	台式电脑		2 台		数据处理

试验获得 840 分钟的摄像带，10 个 GPS 关于不同类型的车在不同区域、不同道路上共六天的工况记录（共 1024078 组数据），70 个 VOCE 关于机动车启动情况的记录。

5. 数据结果

5.1 各种机动车工况点分布（速度 - 加速度）

本次调查共使用 10 台 GPS，持续 6 天，产生 103 万组数据，记录下各种机动车行驶工况 1,030,399 秒。以下以 2004 年 6 月 9 日（星期三）各车辆的行驶工况测试结果为例，分别讨论各种车辆类型的行驶工况特点。

5.1.1 公交车工况点分布

图 3-2 和图 3-3 显示了公交车行驶工况。由图，平均行驶速度为 12.05km/h，工况点主要分布在 0~20km/h 内，最大速度不超过 55km/h；加速度主要分布在 -1.0 m/s² ~ +1.0 m/s²，各种速度条件下的加减速工况点很密。其主要原因是由于公交车要频繁地停靠站台，并且要考虑到乘客的安全和舒适，所以其行驶车速较低，而且加减速比较频繁。公交车的具体工况参数见表 3-11。

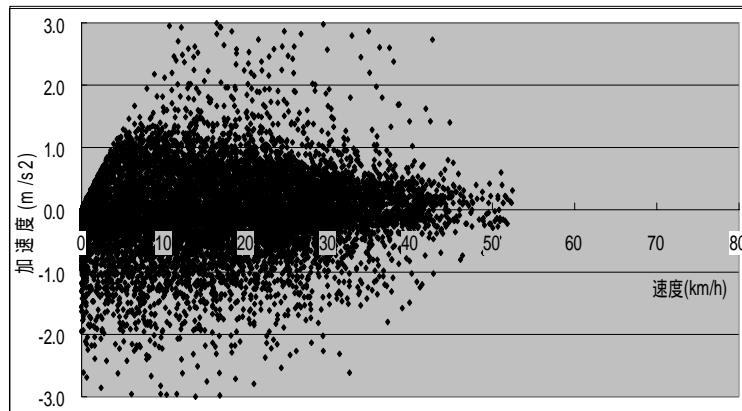


图 3-2 公交车速度-加速度分布图

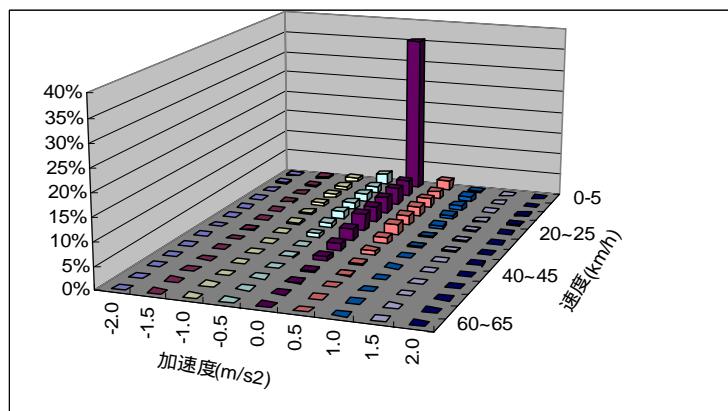


图 3-3 公交车工况点分布图

表 3-11 公交车运行工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
16050	12.05	15.82	52.59	29.3	26.3	23.6	20.7

5.1.2 卡车工况点分布

图 3-4 和图 3-5 显示了卡车的运行工况。从图中可以看出，卡车的行驶速度分布范围较公交车要广，主要分布在在 0~40 km/h 内，最大速度超过 60km/h，加速度主要分布在 -0.5~+0.5 m/s²。由于上海市限制卡车在白天进入内环线以内区域，因此卡车在白天主要行驶在内环以外车速较快的快速干道上；晚上市区交通状况稍微好转，卡车允许进入。因此，总的来说，卡车的平均速度要比公交车高很多，而且行驶比较平稳，加速度的绝对值很小。卡车的具体工况参数见表 3-12。

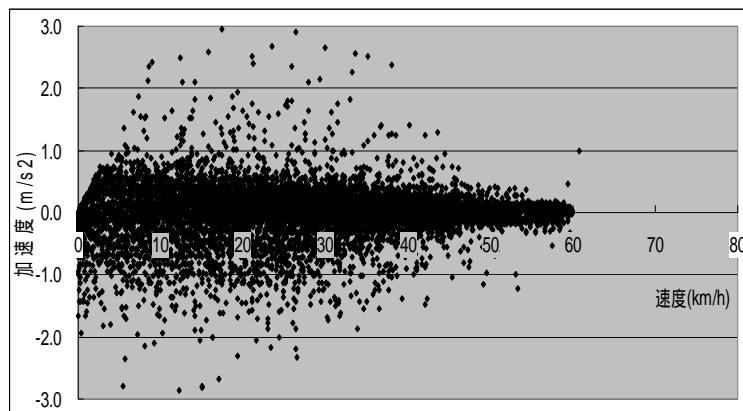


图 3-4 卡车的速度-加速度分布图

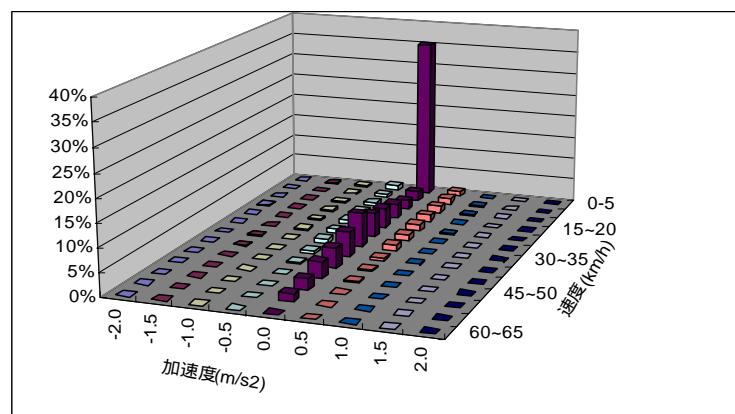


图 3-5 卡车的工况点分布图

表 3-12 卡车运行工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
16352	18.29	26.16	60.85	33.1	19.7	14.1	33.1

5.1.3 出租车工况点分布

图 3-6 和图 3-7 显示了出租车的行驶工况。从图中可以看到出租车的速度分布主要集中在 0~40km/h 和 60~100km/h 的范围内，最大速度接近 120m/h，低速状态下加速度主要分布在 $-1 \text{ m/s}^2 \sim +1 \text{ m/s}^2$ ，高速状态下加速度主要分布在 $-0.5\text{m/s}^2 \sim +0.5 \text{ m/s}^2$ 。出租车的平均速度较公交车和卡车要快很多，而且最高速度也很高。这种情况与出租车的运行特点有关，相对公交车与卡车，出租车的行驶区域主要集中在街区和快速干道上，使得其工况点呈现出高、低速两种状态。出租车的具体工况参数见表 3-13。

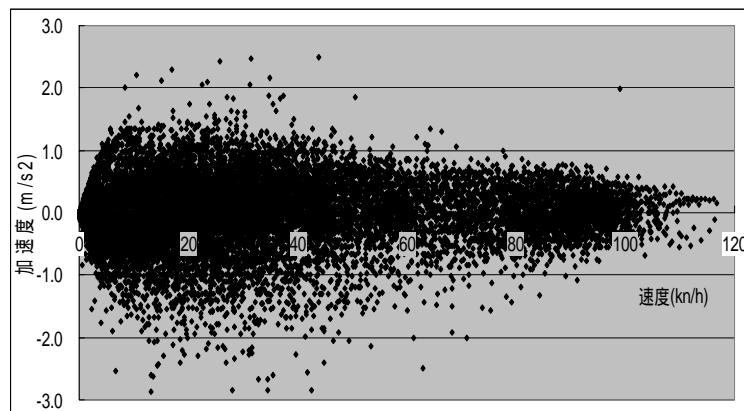


图 3-6 出租车的速度-加速度分布图

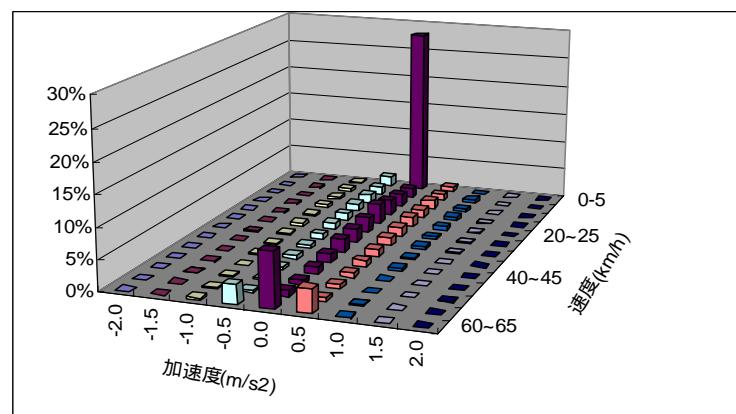


图 3-7 出租车的工况点分布图

表 3-13 出租车运行工况

工况点	平均速 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
20087	28.29	31.71	116.82	20.6	28.4	25.4	25.5

5.1.4 摩托车工况点分布

图 3-8 和图 3-9 显示了摩托车的行驶工况。从图中可以看出摩托车的行驶速度主要分布在 0~5km/h 和 10~20km/h 范围内，最大速度超过 50km/h，加速度主要分布在 $-1.0 \text{ m/s}^2 \sim +1.0 \text{ m/s}^2$ 。摩托车的行驶状态比较自由，工况点的分布比较分散。摩托车的具体工况参数见表 3-14。

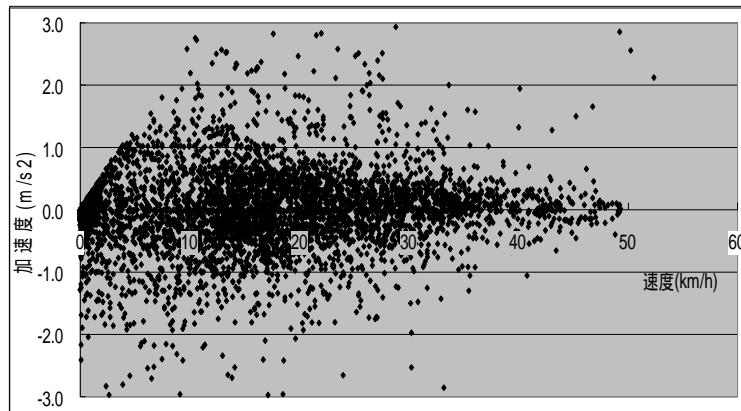


图 3-8 摩托车的速度-加速度分布图

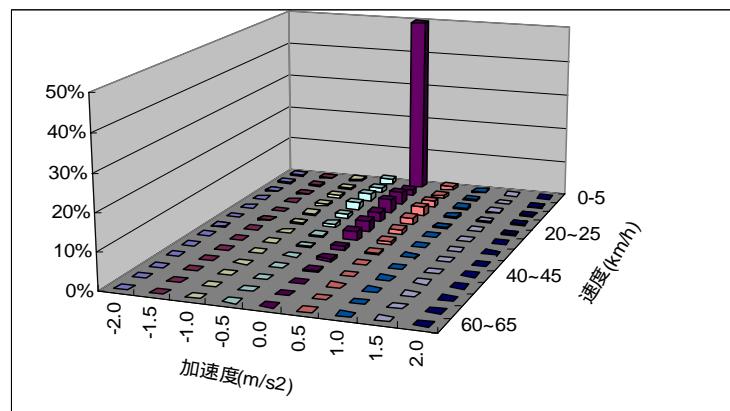


图 3-9 摩托车的工况点分布图

表 3-14 Motorcycle 运行工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
9182	9.63	12.95	52.40	40.2	20.4	18.8	20.6

5.2 不同道路车流的时间 - 速度分布特征及工况点分布

5.2.1 中心城区（高收入区）

- 城市快速干道

从图 3-10 可见，中心城区快速干道上的车速主要分布于 20 km/h ~ 50 km/h，加速度主要分布于 -0.5 m/s^2 ~ $+0.5 \text{ m/s}^2$ 。上海市中心城区的快速干道主要是指内环高架道路，这些道路相对路况较好，机动车基本上保持中高速运行状态，怠速很少，车辆多保持在匀速状态下。

表 3-15 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上的最高速度为 77.84 km/h，平均运行速度达 31.27 km/h，怠速比只有 5.7%，交通流畅。

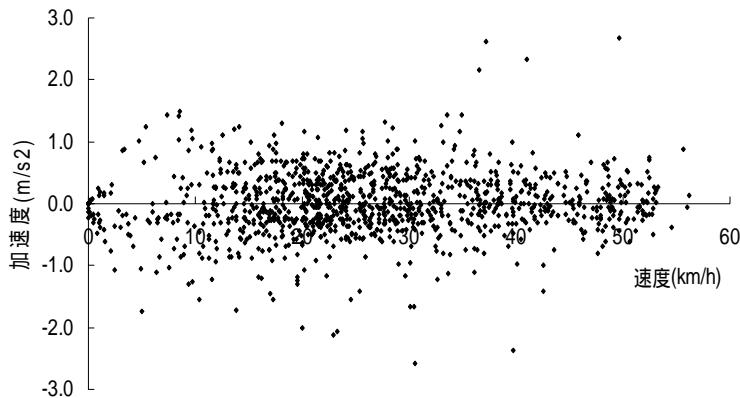


图 3-10 上海市中心城区快速干道典型的速度加速度分布图

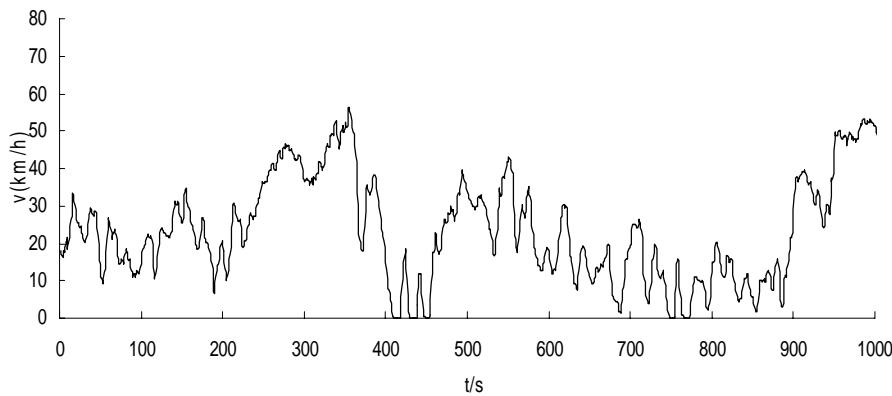


图 3-11 上海市中心城区快速干道典型行驶工况 (源:D:\王海鲲\数据处理\GPS)

表 3-15 上海市中心城区快速干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
11144	29.49	31.27	77.84	5.7	33.7	34.0	26.6

● 城市主干道

从图 3-12 可见，中心城区主干道上的车速主要分布于 0 km/h~10 km/h 和 30 km/h~40 km/h，加速度主要分布于 -1 m/s^2 ~ $+1.0 \text{ m/s}^2$ 。上海市中心城区主干道的特点是车流量很大，交通信号灯比较密集，所以该道路运行条件非常差，怠速状态的比例相当高，车辆很难保持在匀速状态下。值得关注的是，由于车流量日益增大，交通管理不尽完善，上海市的交通主干道正在渐渐失去其作为市内交通枢纽的功能，拥堵现象日益严重。

对交通的分析要弱化

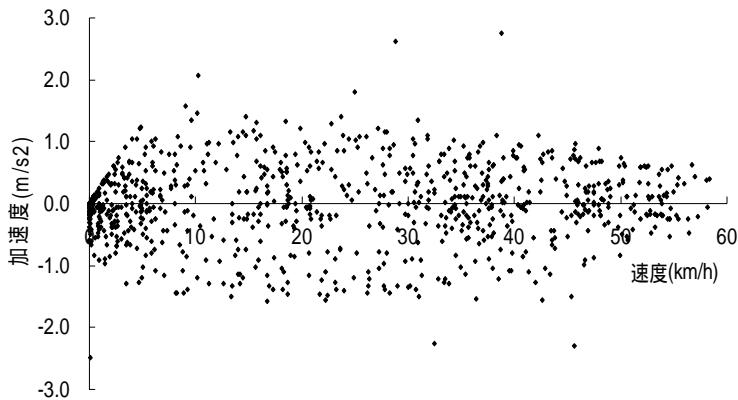


图 3-12 上海市中心城区主干道典型的速度与加速度分布

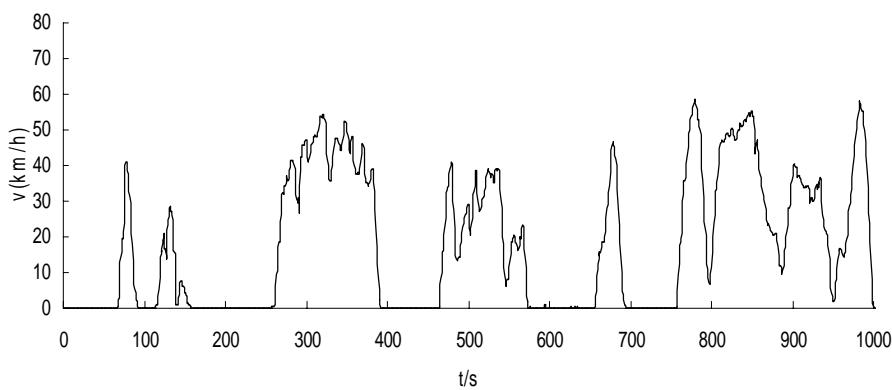


图 3-13 上海市中心城区主干道典型行驶工况

表 3-16 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上的最高速度为 68.30 km/h，平均速度仅为 10.01km/h，怠速比高达 54.8%。

表 3-16 上海市中心城区主干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最高速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
29266	10.01	20.60	68.30	54.8	17.0	17.7	10.5

● 城市次干道

从图 3-14 可见，中心城区次干道上的车速在 10 km/h ~ 30 km/h 范围内，分布比较均匀，车速比较慢。上海市中心城区次干道由于接近居民区，所以该类道路上机动车的车速较低，但交通比较顺畅，怠速比较小。

表 3-17 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上的最高速度为 52.98 km/h，平均速度为 14.93 km/h，怠速比为 23.3%，交通情况要优于主干道。

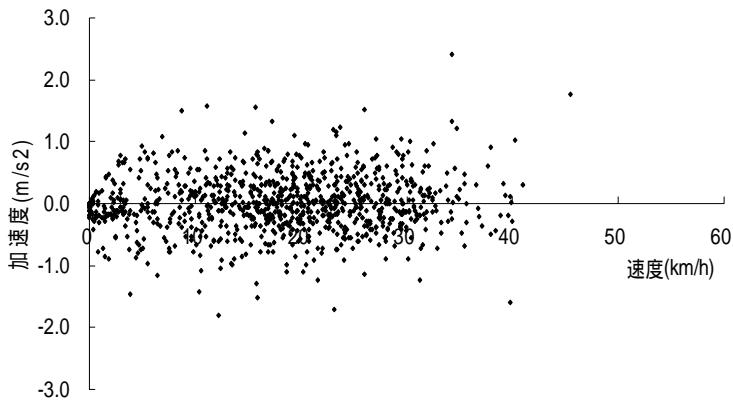


图 3-14 上海市中心城区次干道典型的速度与加速度分布图

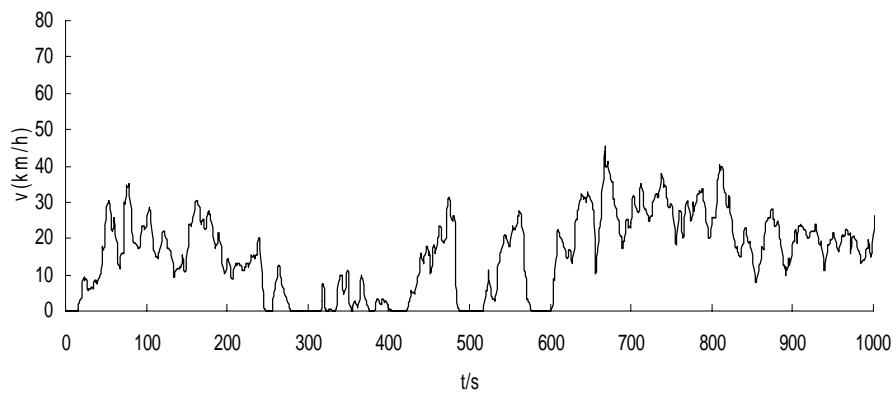


图 3-15 上海市中心城区支路典型行驶工况

表 3-17 上海市中心城区次干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
17752	14.93	19.46	52.98	23.3	26.7	27.8	22.2

5.2.2 商业区（中收入区）

- 城市快速干道

从图 3-16 可见，商业区快速干道上的车速主要分布在 10~30km/h 和 40~60km/h 范围，车速比较快。商业区的快速干道也以高架道路为主，该类道路上交通比较顺畅，怠速比较小。

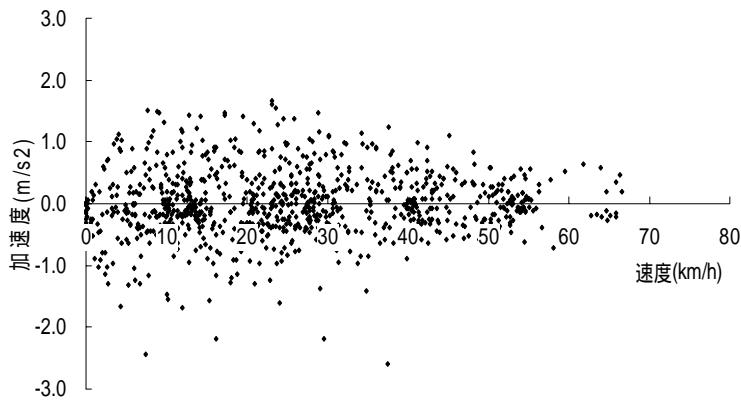


图 3-16 上海市商业区快速干道速度与加速度分布图

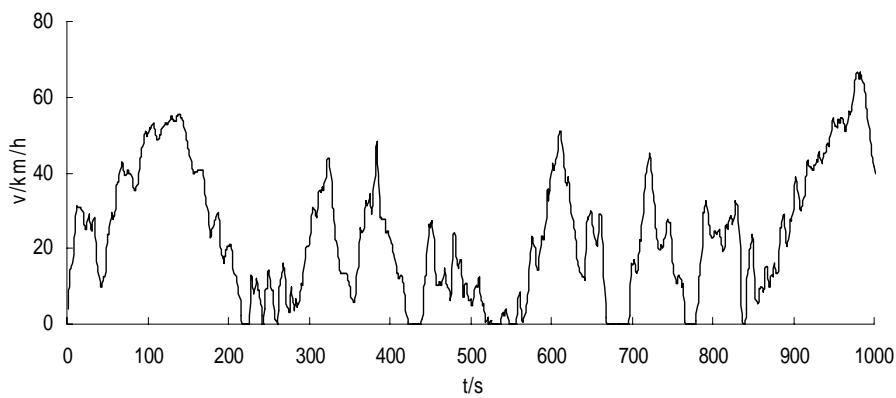


图 3-17 上海市商业区快速干道典型行驶工况

表 3-18 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上的最高速度高达 83.71km/h，平均速度为 22.48km/h，怠速比仅为 11.5%。

表 3-18 上海市商业区快速干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
10937	22.48	25.40	83.71	11.5	30.4	31.3	26.8

● 城市主干道

商业区主干道与中心城区主干道的行驶特点相似，同样比较拥堵，机动车处于怠速的情况较为严重；车速较慢，主要分布在 0~10km/h 和 20~30km/h 范围。

表 3-19 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上的最高速度为 61.85km/h，平均速度为 13.22km/h，怠速比很高，为 32.4%。

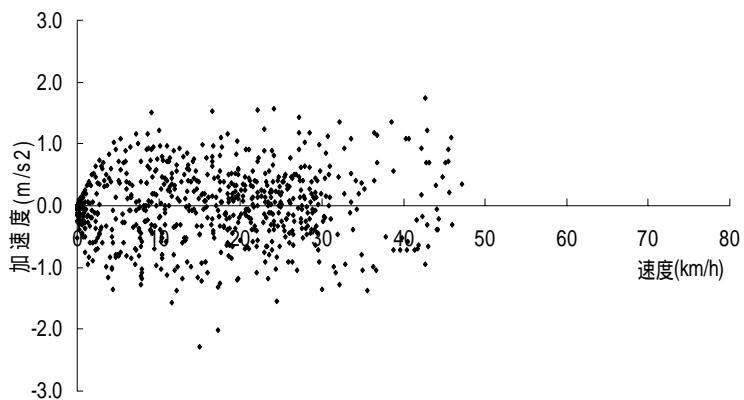


图 3-18 上海市商业区主干道速度与加速度分布图

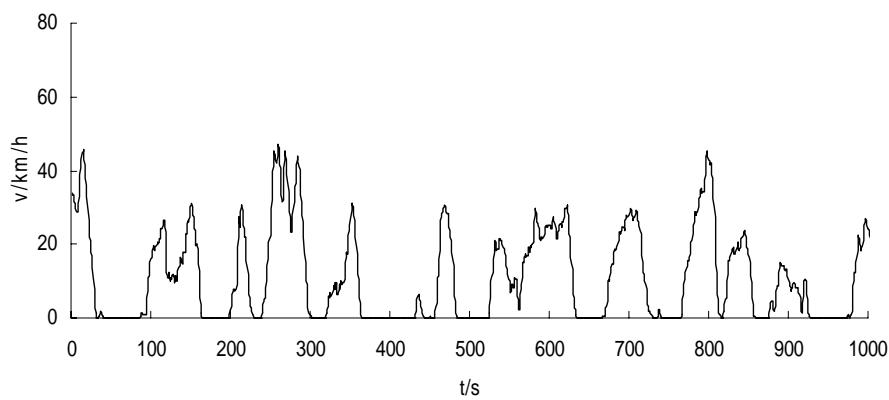


图 3-19 上海市商业区主干道典型行驶工况

表 3-19 上海市商业区主干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
22965	13.22	19.55	61.85	32.4	24.6	25.6	17.4

● 城市次干道

从图 3-20 和 3-21 可见，商业区次干道上交通情况要优于主干道，但比快速干道要差；车速主要分布在 20~50km/h 范围内，车速较高。

表 3-20 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上的最高速度为 76.76km/h，平均速度为 21.0km/h，怠速比为 22.5%。

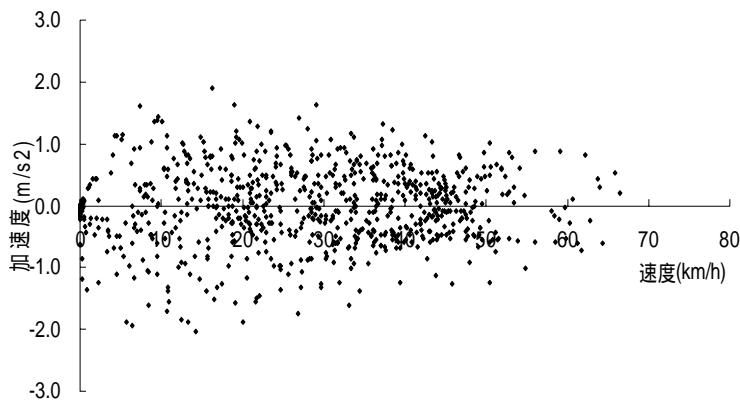


图 3-20 上海市商业区次干道速度与加速度分布图

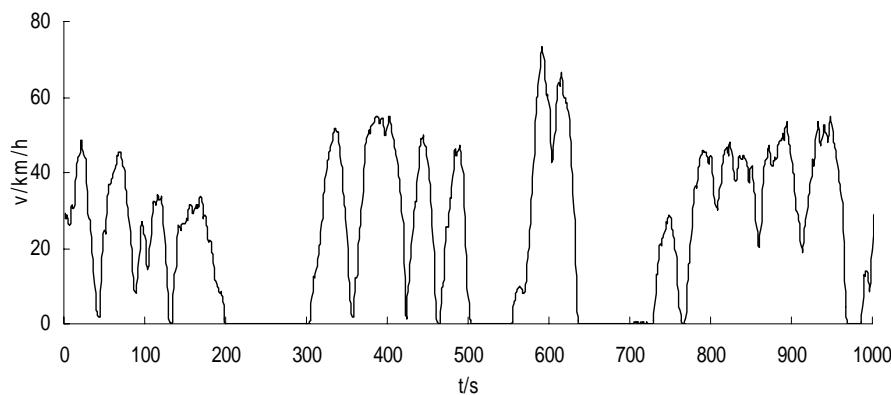


图 3-21 上海市商业区次干道典型行驶工况

表 3-20 上海市商业区次干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
22536	21.0	27.1	76.76	22.5	29.6	29.7	18.2

5.2.3 城郊结合地区（低收入区）

- 城市快速干道

上海市城郊结合地区的快速干道主要是指外环线道路。从图 3-22 和 3-23 可见，城郊结合地区快速干道上交通很流畅，机动车基本上一直处于高速运行状态；车速主要分布在 50 km/h ~ 70 km/h 范围内，车速很高，车况明显好于城市中心区和商业区的快速干道。

表 3-21 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上平均速度高达 47.46 km/h，交通相当流畅，怠速比仅为 7.7%。

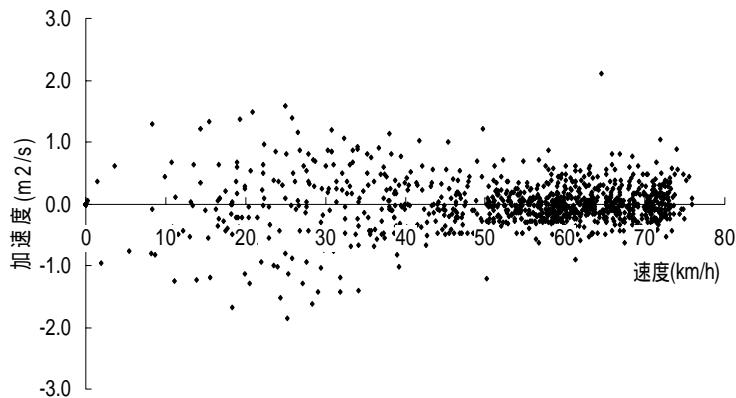


图 3-22 上海市城郊结合地区快速干道速度与加速度分布

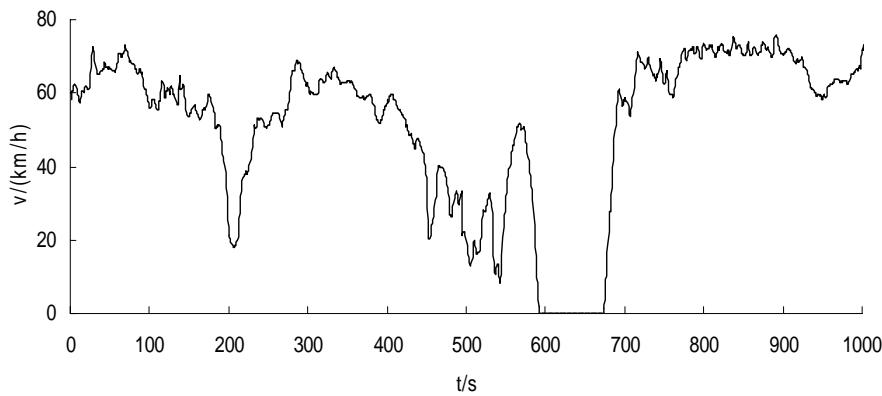


图 3-23 上海市城郊结合地区快速干道典型行驶工况

表 3-21 上海市城郊结合地区快速干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
8861	47.46	51.43	92.55	7.7	29.5	29.4	33.4

● 城市主干道

从图 3-24 和 3-25 可见，城郊结合地区主干道上交通依旧比较拥挤，怠速比较高，但比城市中心区和商业区主干道车况略好；车速主要分布在 0 km/h~10 km/h 和 30 km/h~40 km/h 范围内，车速比较慢。

表 3-22 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上平均速度为 18.13 km/h，怠速比接近 30%。

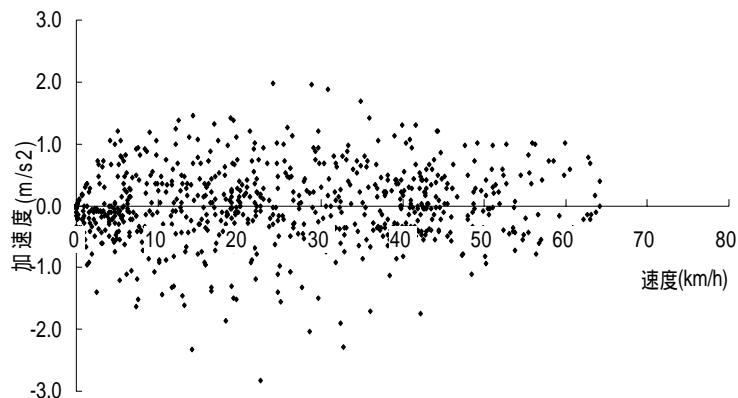


图 3-24 上海市城郊结合地区主干道速度与加速度分布

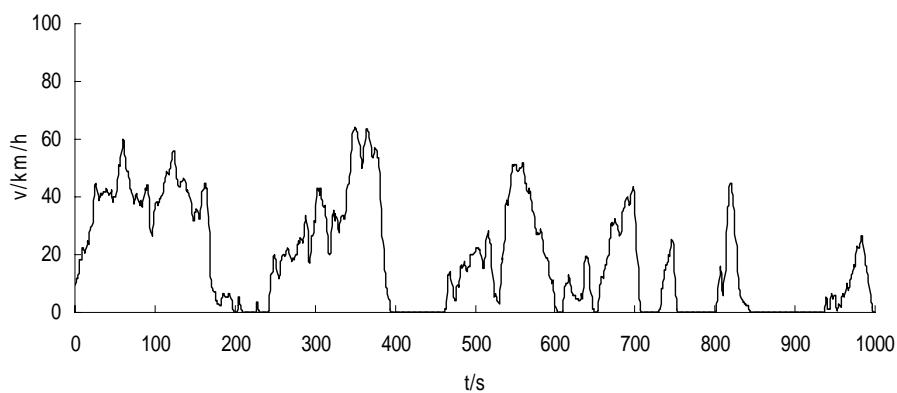


图 3-25 上海市城郊结合地区主干道典型行驶工况

表 3-22 上海市城郊结合地区主干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
24229	18.13	25.51	69.39	28.9	25.3	26.7	19.1

● 城市次干道

从图 3-26 和 3-27 可见，城郊结合地区次干道上交通状况介于快速干道和主干道之间；车速主要分布在 10~20km/h 范围内，车速较慢。

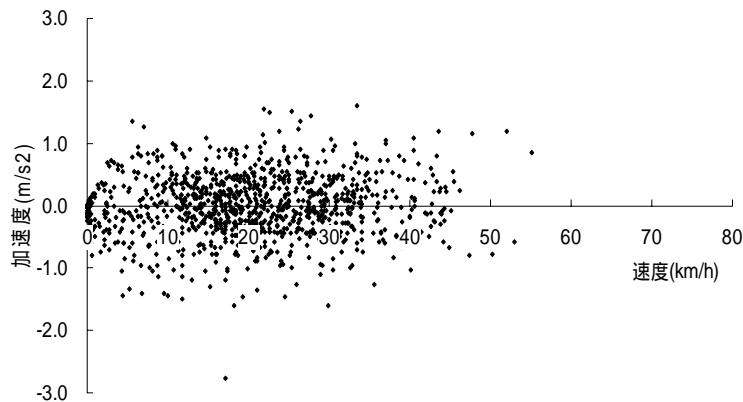


图 3-26 上海市城郊结合地区次干道速度与加速度分布

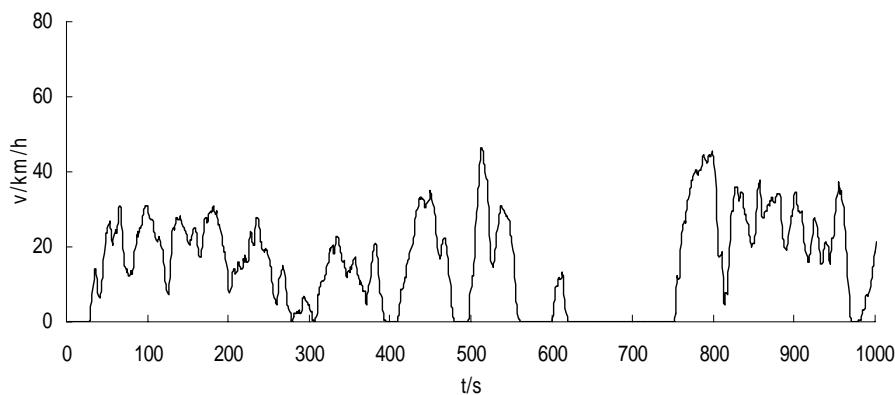


图 3-27 上海市城郊结合地区次干道典型行驶工况

表 3-23 所示该道路上具体工况参数。从表中可见，该道路上平均速度为 16.10 km/h，怠速比为 26.1%。

表 3-23 上海市城郊结合地区次干道行驶工况

工况点	平均速度 (km/h)	平均行驶速度 (km/h)	最大速度 (km/h)	怠速比 (%)	加速比 (%)	减速比 (%)	均速比 (%)
16198	16.10	21.79	59.65	26.1	28.1	28.3	17.5

5.3 上海市车龄分布

5.3.1 车辆行驶里程分布

图 3-28 所示为上海市轿车年行驶里程的分布情况。从图中可见，上海市乘用车 80% 以上年行驶里程小于 3 万公里，年行驶里程小于 1 万公里车辆占 40% 左右，仅有少数车辆年均行驶超过 4 万公里。

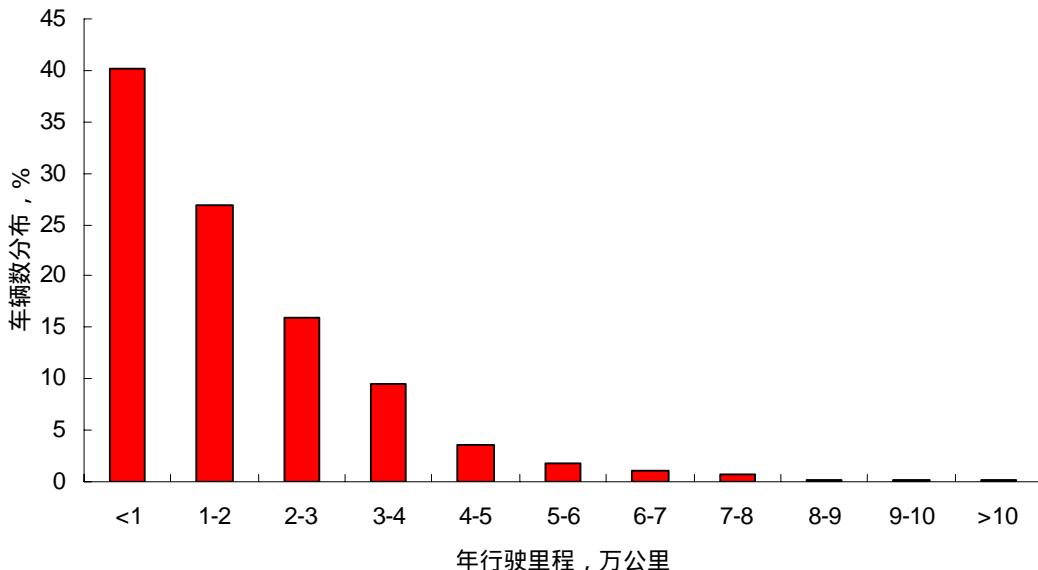


图 3-28 上海市轿车行驶里程分布

5.3.2 车龄分布

图 3-29 为上海市轿车和出租车的车龄分布。由图可见，上海市 50% 以上的车辆为 2002 和 2003 年出厂，车龄较新。由于上海市从 1999 年开始实施欧洲 1 号排放标准，2003 年开始执行欧洲 2 号排放标准，由此也可以认为目前上海市的小轿车基本上是欧洲 1 号或 2 号排放标准的。通过计算，得到上海市的平均车龄为 3.65 年，这一数值低于北京市和国外同类城市，这说明上海市的小轿车平均车龄较低。这种情况主要与上海市机动车的快速增长有关，随着投入使用的新车数量逐年递增，同时老车逐渐淘汰，使得上海市新车占有相当高的比例。

与乘用车不同，上海市出租车由于使用频繁，日均行驶里程在 300 公里以上，所以基本为 5 年淘汰制。从车龄分布上看，主要集中在 3 年车和 4 年车。由图可见，2001 年和 2002 年出厂的出租车占有率超过 80%。

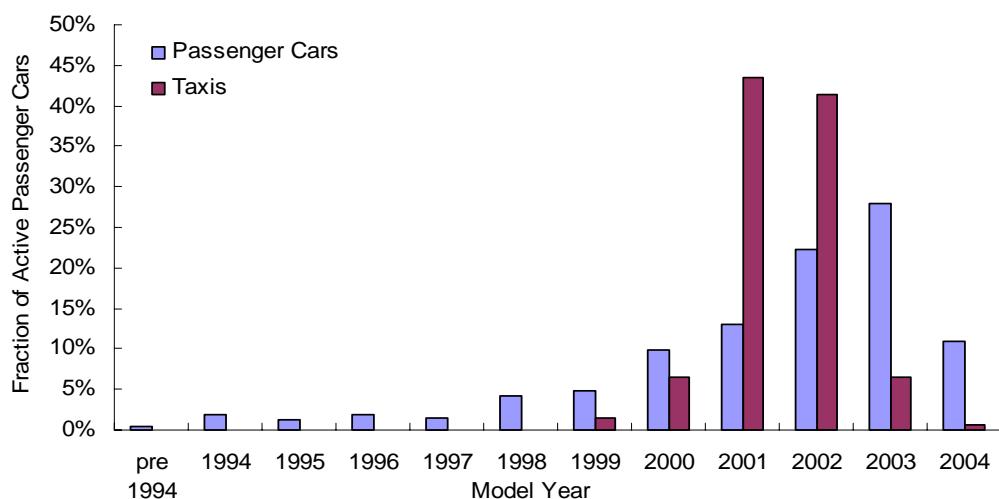


图 3-29 上海市轿车和出租车车龄分布

5.4 上海市车辆技术特点

根据 IVE 模型中对机动车技术的分类情况，以及对上海市停车场的车辆技术调查结果，各种机动车的技术分布情况如下：

5.4.1 轿车技术分布

从表 3-24 的技术分布情况可见，上海市的在用轿车中有 98%的是以汽油为燃料，只有不到 2%的轿车以柴油为燃料；在以汽油为燃料的轿车中，5%的是化油器车，95%的是燃油喷射车；在调查的所有轿车中，有 6%的轿车没有任何尾气控制措施，9%的安装有二元催化装置，85%的安装有三元催化装置。

总体上看，上海市轿车车龄较新，所以大多数车辆的排放控制水平较高，基本达到甚至超了欧洲二号标准的要求。

表 3-24 轿车技术分布

Fuel	Weight	Air/Fuel Control	Exhaust Control	Evapor-ative Control	Age(K km)	Fraction of Miles Driven	Fraction with AC
Petrol	Light	Carburetor	None	PCV	80-161	0.09%	100%
Petrol	Light	Carburetor	None	PCV	>161	0.09%	0%
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	<79	1.41%	100%
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	80-161	1.22%	100%
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	>161	2.25%	96%
Petrol	Light	Carburetor	3-Way	PCV	<79	0.09%	100%
Petrol	Light	Single-Pt FI	2-Way	PCV	<79	0.37%	100%
Petrol	Light	Single-Pt FI	2-Way	PCV	>161	0.09%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	2-Way	PCV	<79	3.19%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	2-Way	PCV	80-161	2.53%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	2-Way	PCV	>161	2.25%	100%
Petrol	Heavy	Single-Pt FI	2-Way	PCV	<79	0.19%	100%
Petrol	Heavy	Single-Pt FI	2-Way	PCV	80-161	0.09%	100%
Petrol	Heavy	Single-Pt FI	2-Way	PCV	>161	0.09%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	3-Way	PCV	<79	3.09%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	3-Way	PCV	80-161	1.12%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	3-Way	PCV	>161	0.37%	100%
Petrol	Heavy	Single-Pt FI	3-Way	PCV	>161	0.09%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	none	PCV	<79	0.19%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	none	PCV	80-161	0.19%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	none	PCV	>161	0.19%	100%
Petrol	Light	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	<79	3.75%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	<79	54.73%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	80-161	8.15%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	>161	3.00%	100%
Petrol	Heavy	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	<79	7.97%	100%
Petrol	Heavy	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	80-161	1.12%	100%
Petrol	Heavy	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	>161	0.84%	100%
Diesel	Medium	Pre-Chamber Inject.	None	None	<79	0.09%	100%
Diesel	Medium	Pre-Chamber Inject.	None	None	80-161	0.28%	100%
Diesel	Medium	Pre-Chamber Inject.	None	None	>161	0.09%	100%
Diesel	Heavy	Pre-Chamber Inject.	None	None	<79	0.09%	100%

Diesel	Heavy	Pre-Chamber Inject.	None	None	80-161	0.19%	100%
Diesel	Heavy	Pre-Chamber Inject.	None	None	>161	0.09%	100%
Diesel	Medium	Direct Injection	EGR+Improv	None	80-161	0.19%	100%
Diesel	Heavy	Direct Injection	EGR+Improv	None	<79	0.09%	100%
Diesel	Heavy	Direct Injection	EGR+Improv	None	>161	0.09%	100%

5.4.2 出租车技术分布：

从表 3-25 可见，上海市的在用出租车中，以汽油为燃料的占 73%，汽油/石油气双燃料车占 27%。由于上海市出租车的淘汰年限一般为 5 年，而普通轿车一般为 15 年，所以出租车的平均车龄要比普通轿车还要低，因此出租车基本上都安装有三元催化器。

表 3-25 出租车技术分布

Fuel	Weight	Air/Fuel Control	Exhaust Control	Evapor-ative Control	Age(K km)	Fraction of Miles Driven	Fraction with AC
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	>161	2.16%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	3-Way	PCV	<79	1.44%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	3-Way	PCV	80-161	4.32%	100%
Petrol	Medium	Single-Pt FI	3-Way	PCV	>161	46.76%	100%
Petrol	Heavy	Single-Pt FI	3-Way	PCV	<79	1.44%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	<79	2.88%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	80-161	1.44%	100%
Petrol	Medium	Multi-Pt FI	3-Way	PCV	>161	12.95%	100%
Propane	Medium	FI	3-Way	PCV	<79	2.88%	100%
Propane	Medium	FI	3-Way	PCV	>161	23.74%	100%

5.4.3 公交车技术分布

从表 3-26 可见，上海市的在用公交车中，以柴油车为主，占 76%。有近 30% 公交车还没有达到欧洲一号标准，没有或者说基本上没有采取排放控制措施。而且，由于公交车维护状况不佳，以及经常停靠（不停的处于加减速和怠速状态）等，导致其排放（特别是颗粒物和挥发性有机物）很高。

表 3-26 公交车技术分布

Fuel	Weight	Air/Fuel Control	Exhaust Control	Evapor-ative Control	Age(K km)	Fraction of Miles Driven	Fraction with AC
Petrol	Medium	FI	none	PCV	<79	4.51%	60%
Petrol	Medium	FI	none	PCV	80-161	1.53%	60%
Petrol	Medium	FI	Euro I	PCV	<79	13.60%	60%
Petrol	Medium	FI	Euro I	PCV	80-161	4.51%	60%
Diesel	Light	Direct Injection	Improved	None	<79	3.22%	60%
Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	None	<79	11.34%	60%
Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	None	80-161	3.78%	60%
Diesel	Heavy	Direct Injection	Improved	None	<79	2.33%	60%
Diesel	Heavy	Direct Injection	Improved	None	80-161	0.80%	60%
Diesel	Medium	FI	Euro I	None	<79	33.95%	60%
Diesel	Medium	FI	Euro I	None	80-161	11.34%	60%
Diesel	Heavy	FI	Euro I	None	<79	6.84%	60%
Diesel	Heavy	FI	Euro I	None	80-161	2.25%	60%

5.4.4 卡车技术分布

从表 3-27 可见，上海市的在用卡车中，以柴油为燃料的占 70%；以汽油为燃料的占 30%。只有 10% 卡车达到欧洲一号标准，也就是说还有 90% 的卡车没有或者说基本上没有采取排放控制措施。这说明对目前上海市并没有很好的对卡车和公交车之类的重型车排放进行严格控制，重型车的排放相当严重。因此，在加强对轻型车排放控制的同时，应该加大对重型车排放污染的研究和控制。

表 3-27 卡车技术分布

Fuel	Weight	Air/Fuel Control	Exhaust Control	Evapor-ative Control	Age(K km)	Fraction of Miles Driven
Petrol	Light	Carburetor	None	PCV	<79	1.35%
Petrol	Light	Carburetor	None	PCV	80-161	2.70%
Petrol	Light	Carburetor	None	PCV	>161	9.45%
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	<79	1.35%
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	80-161	2.70%
Petrol	Medium	Carburetor	None	PCV	>161	9.45%
Petrol	Light	FI	Eurol	PCV	<79	1.50%
Petrol	Medium	FI	Eurol	PCV	<79	1.50%
Diesel	Light	Direct Injection	Improved	None	<79	3.15%
Diesel	Light	Direct Injection	Improved	None	80-161	6.30%
Diesel	Light	Direct Injection	Improved	None	>161	22.05%
Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	None	<79	3.15%
Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	None	80-161	6.30%
Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	None	>161	22.05%
Diesel	Light	FI	Eurol	None	<79	3.50%
Diesel	Medium	FI	Eurol	None	<79	3.50%

5.4.5 摩托车和助动车

由于缺乏详细的统计资料，摩托车和助动车的技术分类无法很细，以下分类为经验数据。摩托车主要是四冲程化油器车辆；而助动车则以二冲程汽油机以及液化石油气助动车为主。具体分类如表 3-28 和表 3-29 所示。

表 3-28 摩托车技术分布

Fuel	Weight	Air/Fuel Control	Exhaust Control	Evapor-ative Control	Age(K km)	Fraction of Miles Driven
Petrol	Light	4-Cycle, Carb	None	None	26-50	100%

表 3-29 助动车技术分布

Fuel	Weight	Air/Fuel Control	Exhaust Control	Evapor-ative Control	Age(K km)	Fraction of Miles Driven
Petrol	Light	2-Cycle	None	None	>50	50%
CNG/LPG	Light	4-Cycle, Carb	Improved	None	26-50	50%

5.5 车辆的 VSP Bins 分布

VSP (Vehicle Specific Power) 主要是指车辆的比功率。过去的研究通常利用车速以及加速度与排放的关系来研究不同工况下的车辆排放状况，而这种关系

实际上与发动机的输出功率有关。当发动机比功率较高时，燃油喷射量越大，使得各种污染物排放增加，相反比功率越低，污染物排放越少。VSP 理论已在机动车研究中得到广泛应用 (José L. Jiménez, 1999)。IVE 模型使用 VSP 来校正行驶工况对排放的影响。具体表达式如下：

$$\text{比功率 (VSP)} = v * [1.1 * a + 9.81 * (\tan(\sin(G))) + 0.132] + 0.000302 * v^3$$

其中：

v = 机动车速度 , m/s

a = 机动车加速度 , m/s²

G = 道路坡度= $(h_{t=0} - h_{t=-1}) / v_{t=-1 \text{ to } 0}$

h = 海拔 , m

发动机比功率的变化会使发动机产生不同的负荷，若比功率变化过于急剧（一般认为是在扭距较大的情况下），发动机的负荷也较大。为了使排放和机动车运行工况的关系更加精确，IVE 又使用了发动机负荷 (Engine Stress)，其中 RPMIndex 是指扭距参数；PreaveragePower 是指在瞬时功率前 25 秒至前 5 秒内的平均比功率，主要是为了描述该时段内的比功率的变化情况。表达式如下：

$$\text{发动机负荷 (Engine Stress)} = \text{RPMIndex} + 0.08 * \text{PreaveragePower}$$

其中：

$\text{PreaveragePower} = \text{Average} (\text{VSP}_{t=-5\text{sec} \text{ to } -25\text{sec}})$, Kw/ton

$\text{RPMIndex} = \text{Velocity}_{t=0} / \text{SpeedDividder}$, unitless

Minimum RPMIndex = 0.9

表 3-30 所示为 IVE 中有关 RPMIndex 分布的说明。

表 3-30 RPMIndex 计算过程中使用的割点

Speed Cutpoints (m/s)		Power Cutpoints (kW/ton)		Speed Divider (s/m)
Min	Max	Min	Max	
0.0	5.4	-20	400	3
5.4	8.5	-20	16	5
5.4	8.5	16	400	3
8.5	12.5	-20	16	7
8.5	12.5	16	400	5
12.5	50	-20	16	13
12.5	50	16	400	5

因此，各种机动车的 GPS 数据被分成 20 种 VSP 和 3 种 Engine Stress，因此每种机动车的行驶工况均可以分配到 60 个 Bin 中，如表 3-31 所示。IVE 模型就是将机动车行驶工况归纳成不同的 Bin 从而更加准确的评价机动车排放和行驶

工况的关系。

表 3-31 IVE 中 Bin 的界定

Bin	VSP (kW/Ton)		Engine Stress	
	Lower	Upper	Lower	Upper
0	-80.0	-44.0	-1.6	3.1
1	-44.0	-39.9	3.1	7.8
2	-39.9	-35.8	7.8	12.6
3	-35.8	-31.7		
4	-31.7	-27.6		
5	-27.6	-23.4		
6	-23.4	-19.3		
7	-19.3	-15.2		
8	-15.2	-11.1		
9	-11.1	-7.0		
10	-7.0	-2.9		
11	-2.9	1.2		
12	1.2	5.3		
13	5.3	9.4		
14	9.4	13.6		
15	13.6	17.7		
16	17.7	21.8		
17	21.8	25.9		
18	25.9	30.0		
19	30.0	1000.0		

下图为 VSP 与各种污染物的排放关系。可以看到，在比功率很高的情况下，车辆的排放将急剧增加，个别点的排放是一般情况的 200 多倍。

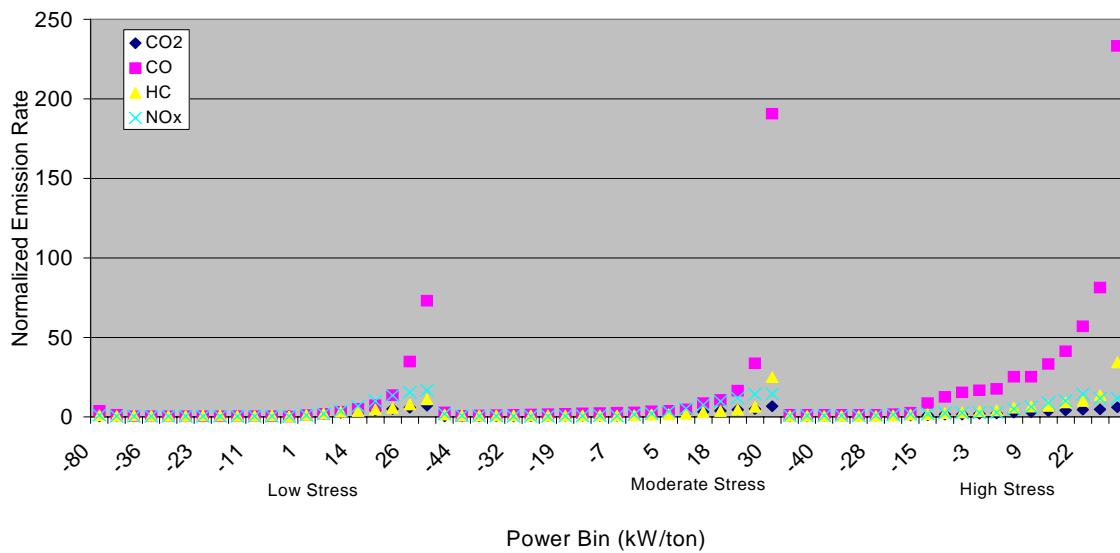


图 3-30 VSP 与各种污染物排放示例

5.5.1 各类机动车的 VSP Bins 分布

表 3-32~3-38 显示了上海市各类机动车的比功率 (VSP) 分布情况。可以看

出，各类机动车的比功率都主要集中于 Bin 12 附近。其中轿车运行时，其发动机功率有 42.88%（快速干道）69.91%（主干道）和 57.83%（次干道）处于 Bin 12 状态；出租车、公交车、卡车和摩托车分别有 57.19%、63.25%、55.48% 和 64.08% 处于 Bin 12 状态。而 Bin 12 附近代表的是机动车处于怠速时的发动机比功率状态，这就说明上海市机动车在相当大的一部分时间运行速度很低，接近怠速。而有部分点分布于中等发动机负荷状态下。

表 3-32 轿车在快速干道上的 VSP Bins 分布（平均速度：31.97 km/hour）

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%	0.04%	0.07%	0.15%	0.37%	0.78%	2.36%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	9.35%	42.88%	22.83%	12.68%	5.33%	1.57%	0.12%	0.04%	0.01%	0.02%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Med	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.55%	0.56%	0.19%	0.03%	0.02%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
High	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

表 3-33 轿车在主干道上的 VSP Bins 分布（平均速度：12.61 km/hour）

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.04%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.04%	0.20%	0.57%	1.76%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	5.84%	69.91%	12.13%	6.19%	2.26%	0.60%	0.13%	0.04%	0.02%	0.03%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Med	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.06%	0.02%	0.00%	0.02%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
High	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

表 3-34 轿车在次干道上的 VSP Bins 分布（平均速度：17.11 km/hour）

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.00%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.04%	0.08%	0.25%	0.75%	2.38%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	8.06%	57.83%	17.54%	8.03%	3.05%	1.03%	0.27%	0.06%	0.03%	0.06%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Med	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.14%	0.22%	0.09%	0.01%	0.03%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
High	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

表 3-35 出租车的 VSP Bins 分布 (平均速度 : 20.48 km/hour)

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.02%	0.01%	0.01%	0.03%	0.05%	0.11%	0.23%	0.47%	1.03%	2.45%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	6.37%	57.19%	16.30%	8.66%	4.17%	1.28%	0.14%	0.05%	0.02%	0.05%
	0.02%	0.03%	0.03%	0.05%	0.06%	0.39%	0.51%	0.18%	0.05%	0.03%
Med	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.02%	0.03%	0.03%	0.05%	0.06%	0.39%	0.51%	0.18%	0.05%	0.03%
High	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

表 3-36 公交车的 VSP Bins 分布 (平均速度 : 15.42 km/hour)

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.02%	0.04%	0.08%	0.14%	0.43%	1.51%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	5.33%	63.25%	21.62%	6.22%	0.95%	0.20%	0.05%	0.04%	0.02%	0.03%
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Med	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.01%	0.01%	0.00%	0.02%
High	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

表 3-37 卡车的 VSP Bins 分布 (平均速度 : 23.61 km/hour)

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.04%	0.08%	0.26%	0.70%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	2.63%	55.48%	34.21%	5.94%	0.48%	0.07%	0.02%	0.01%	0.00%	0.01%
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Med	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%
High	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

表 3-38 摩托车的 VSP Bins 分布 (平均速度 : 13.46 km/hour)

Stress Group	Power Bins									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Low	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.04%	0.08%	0.08%	0.21%	0.60%	1.73%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	5.89%	64.08%	19.32%	5.74%	1.26%	0.36%	0.16%	0.12%	0.04%	0.08%
	0.00%	0.02%	0.01%	0.02%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.04%
Med	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.02%	0.01%	0.02%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.04%
High	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

5.5 车辆停滞时间分布

表 3-39 所示为利用 VOCE 测得的上海市机动车启动时间以及车辆停滞时间分布。总体来说，上海市车辆每日启动 5.2 次，多数的启动次数集中在早上 06:00~09:00 以及下午 15:00~18:00 之间，这主要与居民上下班出行有关。特别是上午 06:00~09:00，由于多数车辆停了一整晚之后重新启动，所以近 35.97% 的启动为冷启动 (Soak Time < 18hr)。这部分启动将对全市的机动车污染物排放产生重要的影响。

表 3-39 上海市机动车启动时间以及车辆停滞时间分布

Soak Time (hrs)	Overall	06:00-08:59	09:00-11:59	12:00-14:59	15:00-17:59	18:00-20:59	21:00-23:59	00:00-2:59	03:00-05:59
0.25	24%	23.73%	26.69%	25.75%	26.88%	24.85%	18.80%	32.96%	20.27%
0.5	11%	10.06%	19.45%	9.90%	12.95%	8.37%	6.55%	7.70%	8.87%
1	13%	6.55%	16.97%	12.63%	11.02%	16.20%	10.10%	14.28%	11.39%
2	13%	4.85%	13.46%	19.21%	14.33%	19.05%	18.80%	7.70%	8.88%
3	9%	1.04%	5.29%	8.00%	7.95%	9.54%	13.80%	5.50%	16.41%
4	3%	0.16%	0.87%	6.74%	4.83%	2.29%	5.80%	0.00%	2.51%
6	6%	0.52%	0.52%	6.14%	3.94%	3.72%	10.90%	14.28%	6.28%
8	3%	2.94%	0.17%	2.12%	5.55%	1.77%	1.45%	2.20%	5.10%
12	7%	14.18%	2.46%	1.26%	8.59%	8.99%	5.05%	10.98%	7.62%
18	12%	35.97%	14.12%	8.23%	3.95%	5.22%	8.75%	4.41%	12.66%
Events	1426	289	284	238	289	174	184	46	40
Fraction		20%	20%	17%	20%	12%	5%	3%	3%

6. 小结

机动车行驶工况和技术调查结果显示，上海市不同区域、不同时段车流量大小差别较大，但不同区域车流量随时间的变化情况基本一致。车流量高峰主要出现在上午 8:00~9:00、11:00~12:00 和下午 15:00~16:00、18:00~19:00，分别是一天中的上下班时间和商务繁忙的时间。

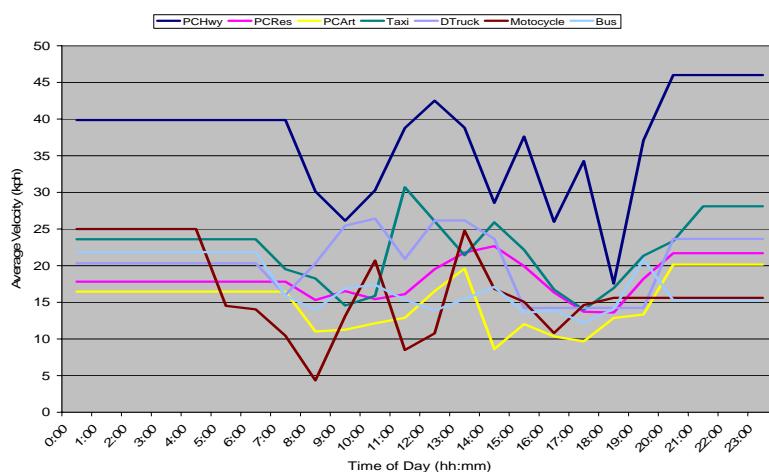


图 3-31 各种机动车平均速度随时间的变化

图 3-30 显示，各车辆类型的平均行驶速度随时间的变化情况。图中可以看出，机动车在城市快速干道上的平均速度最大，在主干道上的平均速度最小。这主要是因为主干道是连接区与区的枢纽，交通流量相当大，堵车现象严重。

通过对上海市中心城区、商业区和城乡结合处 3 个区域、9 条道路行驶工况调查显示，不同区域的机动车行驶工况有所区别，其中城乡结合处的交通状况最好，中心城区最差，这主要是由于中心城区的交通流量大，而城乡结合处的道路设施虽然不如中心城区，但交通流量相对较小。机动车在各种类型道路上行驶工况特征明显，城市快速干道上的工况最好，平均速度最大，怠速比最小，交通最为顺畅。其次是次干道，主干道的行驶工况最差。

不同类型的机动车行驶工况也有较大差别，但是它们的加速度基本上都集中在 $-0.5\sim+0.5\text{m/s}^2$ 之间变化。机动车不同道路上的速度 - 加速度工况点分布有显著区别，正是这些区别决定了机动车的排放特征。

上海市轿车的平均车龄为 3.65 年，车龄较低，车队的平均日行驶里程为 49.2 公里，80% 以上的轿车是 2000 年以后出厂的。上海市目前的小轿车大部分是欧 1 或者欧 2 标准的车辆。**但是，重型车（如卡车和公交车）排放污染物的控制水平相对较低，应该加大对重型车排放污染的研究和控制。**

第四章 机动车排放因子测试

1. 前言

上世纪 90 年代后我国机动车保有量迅速增加，年均增长率约 10%。2000 年全国机动车保有量已达到 1609 万辆^[1]，是 1999 年的 2.9 倍。日趋增加的机动车已经造成了严重的环境污染，并成为我国城市大气污染的主要来源^[2]。为了控制机动车污染，国内专家已经分别在北京、广州、上海这三大城市，开展机动车污染控制战略研究^[3-4]。

就研究手段而言，包括模型预测、实验室模拟和道路实测。模型预测以美国机动车排放模型（Mobile）为主^[5-9]；试验事模拟主要包括底盘测功机^[10-13]测量，道路实测包括遥感技术^[14-15]、五气分析仪^[16]以及隧道法^[17-18]。然而这些研究手段都存在不同程度上的缺陷。首先暂不考虑Mobile模型本身是否可靠，就其能否适应中国国情，仍值得探讨^[19]；底盘测功机测量虽然其在测试过程考虑到多种工况，但仍无法完全反映复杂的实际道路行驶状况；遥感技术与五气分析仪的污染物的分析手段，仍存在较大的限制，两者对基本污染物CO、NO_x、HC的测试均采用NDIR方法，势必引起对NO_x、HC测量的较大误差；而隧道法则需要在测量的准确性，以及如何测量单车排放系数方面着重探讨和解决。

此外，国内已有研究主要集中于轻型汽油车的排放测试与预测，对重型柴油车的排放认识则少之又少。美国加州大学Riverside分校环境研究与技术中心（CE-CERT），开发的“挂式流动排放试验室”（Mobile Emission Lab）不仅解决了前述排放系数实测法存在的各种问题^[20]，而且为重型车在实际道路的排放测试提供了可能^[21]，但就其昂贵的造价，国内尚不具备配备如此精良完善的实验系统的条件。

因此针对目前国内外研究形势与发展趋势，上海市环境科学研究院（SAES）大气所在世界资源研究所（WRI）、美国环保局（USEPA）的支持下，利用美国 Sensors 公司生产的“车载柴油车排放测试仪”，在上海市开展了重型柴油车、公交柴油车以及轻型柴油车的实际道路排放测试。旨在研究该类车型实际道路排放特征，为上海市中长期机动车污染控制提供基础数据。汽油车没测出？？

2. 测试设备

本测试的硬件设备 SEMTECH-D 由 USEPA 以及美国 Sensors 公司共同提供，该设备全称：Sensors Emission Technology-Diesel，系 Sensors 公司为测量柴油车排放专门设计生产。测试过程中所用颗粒物滤膜由 Sensors 公司提供，标准气体由英国 Fitzpatrick Container 公司生产。

3. 测试方法

为更加准确的测量污染物浓度，SEMTECH-D综合了多种分析手段，对CO、CO₂采用非分散红外分析法（NDIR），对NO、NO₂采用非分散紫外分析法（NDUV），对HC采用氢火焰离子检测器（FID），以及对O₂采用电化学法。同时配备全球卫星定位系统（GPS）测量车辆行驶速度，温湿度仪测量环境温度与湿度。仪器在每天的测试前，同时对仪器的准确性和精确性进行校准。在实际路测前对目标污染物进行了调零。从而实现了对污染物浓度、行驶速度、车辆所处地理位置以及环境状态的同步准确逐秒记录。

道路排放测试系统简图，以重型柴油卡车为例，如图 4-1 所示。

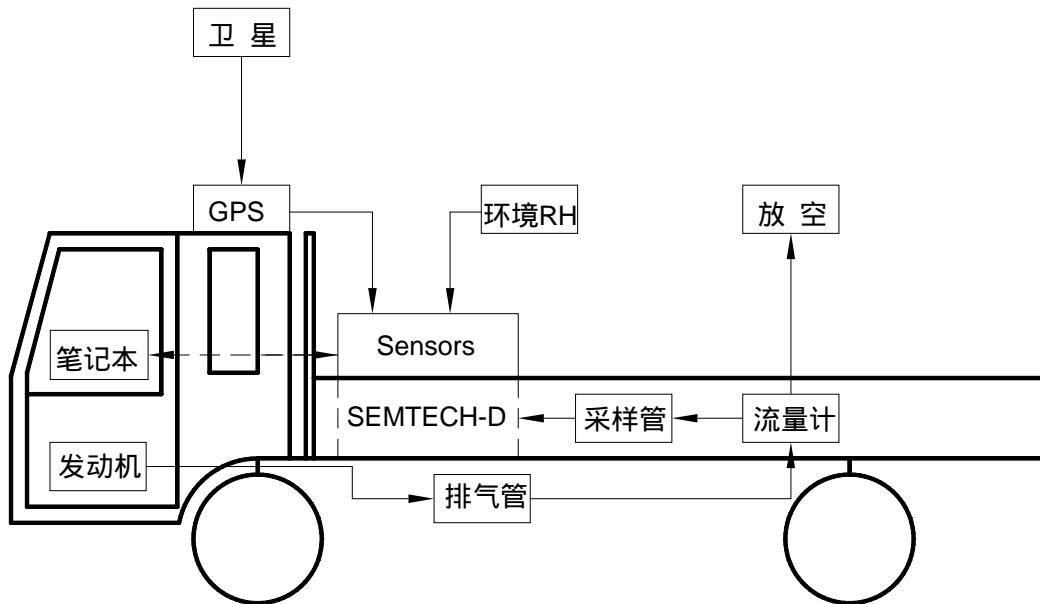


图 4-1 实时车辆排放测试系统简图

4. 测试车辆

从 2004 年 9 月 26 日开始至 2004 年 10 月 26 日期间，共完成 10 辆柴油卡车，2 辆轻型柴油出租车，1 辆公交柴油车的测试。其中对卡车以及出租车采取固定设计路线测试方法，同时对卡车进行了负载测试以及工况测试，对公交车采用其固有路线测试。车辆信息如表 4-1 所示。

表 4-1 被测车辆详细信息

牌照号	车辆类型				发动机	功率	出产年	行驶里程	催化器	燃-空系数	维护
	车辆类型	载重 T	整备重 T	最大载重 T							
沪 A H8396	柴油卡车	3	3.4	6.4	江淮 4105	88.4 马力	2000	350,000	无	直喷	好
沪 A E6022	柴油卡车	6.9	5	11.9	东风 109233	130 马力	2002	78,240	无	直喷	好
沪 A 84645	柴油卡车	2	3	5	解放 4110	95 马力	2001	107,298	无	直喷	好
沪 A D4705	柴油卡车	4	4	6	解放 6110	145 马力	1999	200,000	无	直喷	好
沪 A 99738	柴油卡车	3	3	8	跃进 4102	70 马力	2001	149,000	无	直喷	中
沪 A H4627	柴油卡车	5	5	6	东风 E020820 1360	135 马力	2000	84,000	无	直喷	好
沪 A E5399	柴油卡车	8	5.2	10	解放 6113	235 马力	2002.1	>100,000	无	直喷	中
沪 A C7856	柴油卡车	5	5.9	13.2	东风 YC6108	158 马力	2001	172,251	无	直喷	中
沪 A C9192	柴油卡车	5	4.8	10.9	东风 EQ6102	128 马力	1999.12	205,250	无	直喷	中
沪 A E9864	柴油卡车	5	10.93	15.9	解放 CA12521A2 6110	167 马力	2002.2	162,067	无	直喷	好
沪 A X9265	柴油出租车	5 人	0.475	2.495	福田 BJ5027V2SD5	76 马力	2002.12	198,602	无	直喷	好
沪 A X9931	柴油出租车	5 人	0.55	2.495	江铃宝典 JX 93Q1	76 马力	2003.2	N/A	欧 II	直喷	中
沪 A B5851	柴油公交车	95 人	9.4	6.65	上柴 6114	203 马力	1998.9	415008	欧 I	直喷	好

5. 数据处理

对原始数据的处理，为将污染物浓度转化为排放因子。主要有 4 个方面。

5.1 NO_x湿度校正

考虑到湿度的冷却效应对NO_x的影响，在计算瞬时NO_x时，需要进行校正，校正因子 Kh ，这里采用美国CFR40-86.1342-94 定义的湿度校正因子：

$$Kh = \frac{1}{[1 - 0.0182(H - 10.71)]}$$

H 为绝对湿度 (g/kg dry air)

$$H = \frac{6.211(RH)(P_d)}{P_{baro} - (P_d)(RH / 100)}$$

其中 RH 为相对湿度， P_d 为引擎吸入空气干球温度下的饱和蒸汽压 (Kpa)，可以用经验公式计算：

$$P_d(KPa) = EXP\left[\frac{16.78T_{sample} - 116.9}{T_{sample} + 237.3} \right]$$

5.2 以尾气流量计算的瞬时质量排放 (g/s)

瞬时质量排放，指测量在行驶过程中，逐秒记录的污染质量排放，对该排放的计算采用尾气流量计算法，分 3 个步骤。

- 步骤一：对气体浓度运用干-湿态校正因子

仪器检测到的污染物浓度均为干态浓度，为此在实际计算中首先必须将干态浓度转化为湿态浓度。对目标污染物 M ，转换公式如下：

$$[M]_{wet} = [M]_{dry} \times Kw$$

Kw 为转化因子，它是样品浓缩过程中水汽浓度（体积百分比）的函数。

$$Kw = 1 - [H_2O]_{condensed}$$

$$[H_2O]_{condensed} = [H_2O]_{exhaust} - [H_2O]_{residual}$$

- 步骤二：计算标准状态下尾气体积流量

Sensors 公司的电子质量流量计直接检测了尾气质量流量，这里需要将质量流量 M_f 转化为 20 °C、1 个标准大气压下的标准体积流量。由气体连续性方程：

$$M_f = \rho Q = \rho_{std} Q_{std}$$

$$Q_{std} = \frac{M_f}{\rho_{std}}$$

为计算尾气标准状态的密度，首先需要计算尾气摩尔质量 $WM_{exhaust}$ ：

$$WM_{exhaust} = \frac{1}{100} \sum \{ [CO]_{wet} \times 44.01 + [O_2]_{wet} \times 32.0 + [N_2]_{wet} \times 28.013 + [H_2O]_{wet} \times 18.015 \}$$

再根据标准状态下理想气体状态方程可以得到尾气标准状态下的密度：

$$\rho_{std} = \frac{P(WM_{exhaust})}{RT}$$

- 步骤三：计算瞬时质量排放

目标污染物瞬时质量排放计算公式如下：

$$NO(g/s) = \frac{[NO]_{wet}}{100} \times Q_{std} \times \rho_{NO,std}$$

$$NO_2(g/s) = \frac{[NO_2]_{wet}}{100} \times Q_{std} \times \rho_{NO_2,std}$$

$$CO(g/s) = \frac{[CO]_{wet}}{100} \times Q_{std} \times \rho_{CO,std}$$

$$HC(g/s) = \frac{[HC]_{wet}}{100} \times Q_{std} \times \rho_{HC,std}$$

5.3 瞬时油耗特征排放 (g/kg fuel)

瞬时油耗特征排放指污染物质量与空气/燃料混合气中燃烧的燃料之比值。为了计算该特征排放，首先要计算各污染物与燃烧之燃料的摩尔比，即目标污染物浓度与 CO、HC₁ 以及 CO₂ 的比值。计算过程中，环境 CO₂ 浓度影响需要消除，而环境 CO、HC₁ 的浓度则无需考虑，因为这里假设了环境 CO、HC₁ 已经在燃烧过程中遭到破坏。因此各污染物瞬时油耗特征排放可以计算如下：

$$NO_{fs} \left(\frac{g_NO}{g_fuel} \right) = \left(\frac{[NO]}{[CO] + [HC_1] + [CO_2] - [CO_2]_{ambien}} \right) \times \left(\frac{MW_{NO}}{MW_{fuel}} \right)$$

$$NO_{2,fs} \left(\frac{g_NO_2}{g_fuel} \right) = \left(\frac{[NO_2]}{[CO] + [HC_1] + [CO_2] - [CO_2]_{ambien}} \right) \times \left(\frac{MW_{NO_2}}{MW_{fuel}} \right)$$

$$CO_{fs} \left(\frac{g_CO}{g_fuel} \right) = \left(\frac{[CO]}{[CO] + [HC_1] + [CO_2] - [CO_2]_{ambien}} \right) \times \left(\frac{MW_{CO}}{MW_{fuel}} \right)$$

$$HC_{1,fs} \left(\frac{g_HC_1}{g_fuel} \right) = \left(\frac{[HC_1]}{[CO] + [HC_1] + [CO_2] - [CO_2]_{ambien}} \right) \times \left(\frac{MW_{HC_1}}{MW_{fuel}} \right)$$

其中 NO_x 在上述基础上以 NO_2/NO_x 为 5% 进行计算。

5.4 累计行驶里程特征排放 (g/km)

行驶里程特征排放因子，可以在质量排放因子的基础上计算。即：

$$NO_x = \frac{\sum NO_x \text{ mass}}{\sum \text{kilometers stravelled}}$$

$$CO = \frac{\sum CO \text{ mass}}{\sum \text{kilometers stravelled}}$$

$$HC = \frac{\sum HC \text{ mass}}{\sum \text{kilometers stravelled}}$$

6. 数据结果

本次实验，除在一辆卡车测试中，数据意外丢失之外，其余均获得了很好的测试效果。13 辆被测车，共计有效测量里程 704.811 公里，有效测量时间 107,136 秒，投入科研工作者 10 人，共获取有效原始数据 1,947,114 个，历时 2 个月时间，基本完成原始数据后处理。由于数据量庞大，现选取沪 A 84645，沪 A X9265，沪 A B5851 典型测试结果陈述于下。

6.1 工况分布特点

工况主要包括速度、加速度、油耗等等。其分布特征可以用怠速、加速、减速、等速所占百分比以及速度—加速度—工况点分布图来表征，如图 4-2~图 4-4，以及图 4-5~图 4-7。

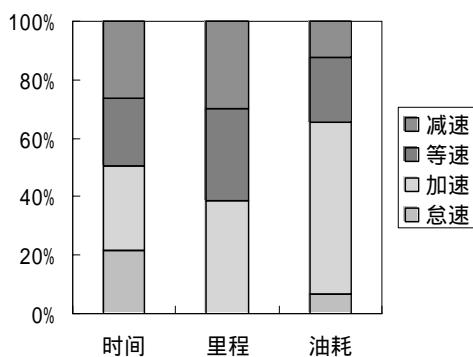


图 4-2 重型柴油卡车不同工况贡献率

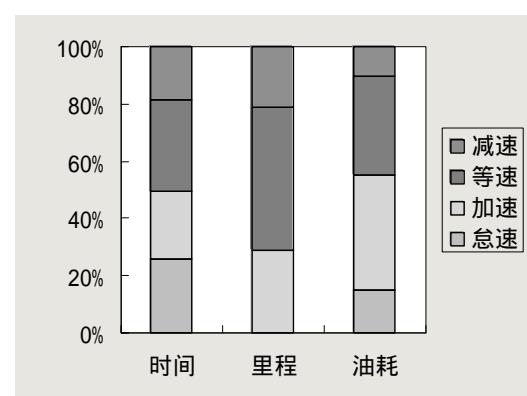


图 4-3 公交柴油车不同工况贡献率

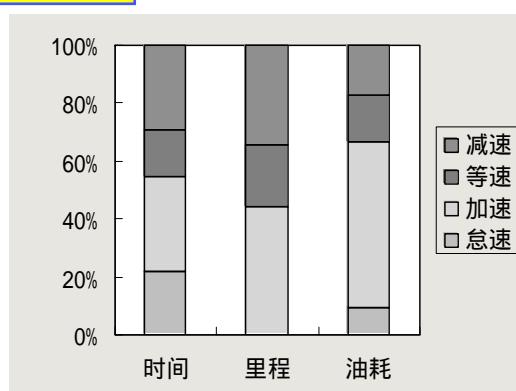


图 4-4 出租柴油车不同工况贡献率

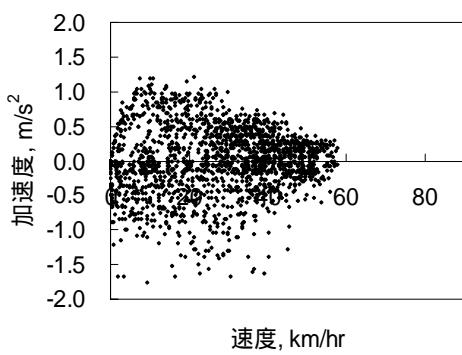


图 4-5 重型柴油卡车速度-加速度-工况点分布图

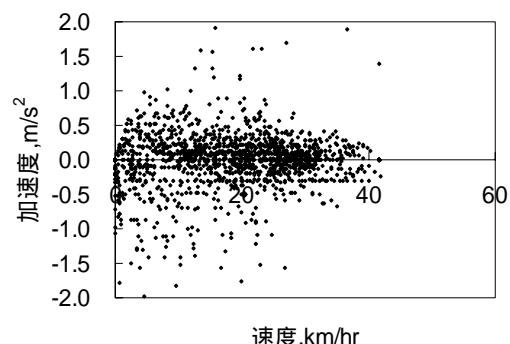


图 4-6 公交柴油车速度-加速度-工况点分布图

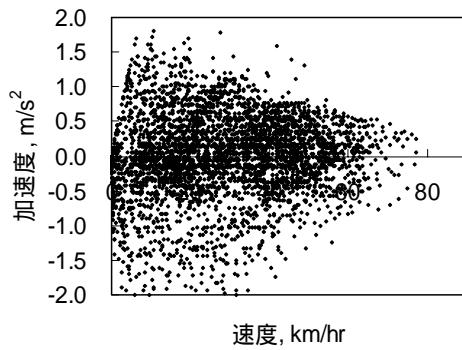


图 4-7 出租柴油车速度-加速度-工况点分布图

根据车辆在不同城市道路上速度-加速度分布可以看出，城市快速道路、主干道以及次干道上车辆行驶工况的不同。如图 4-8~图 4-10 所示。

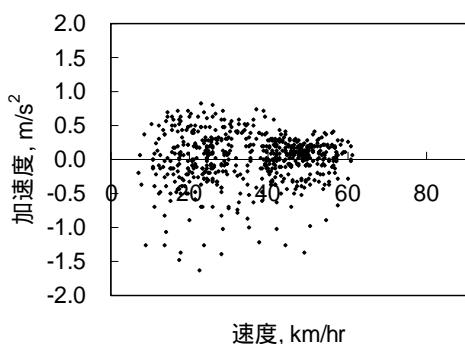


图 4-8 重型车在城市快速道路上工况点分布图

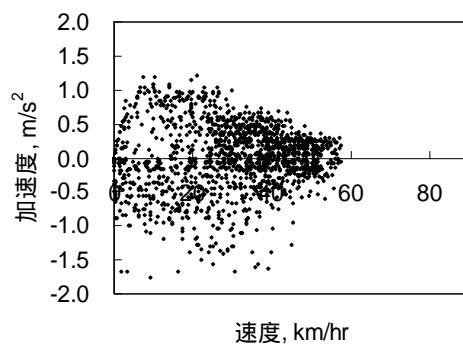


图 4-9 重型车在城市主干道工况点分布图

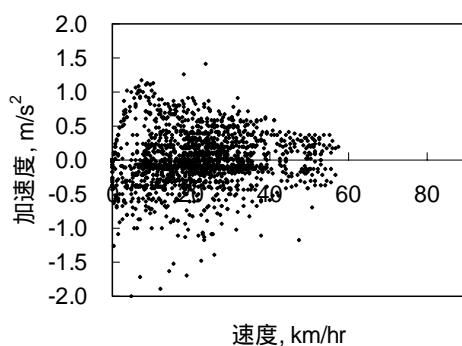


图 4-10 重型城市次干道上的工况点分布图

6.2 加速度 - 油耗分布特征

加速度-油耗分布，旨在探讨机动车油耗与加速度之间的关系，如图 4-11~

图 4-13 所示。

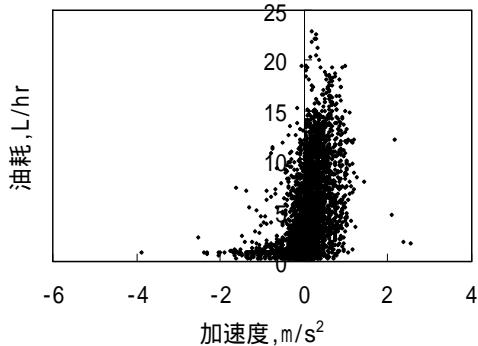


图 4-11 重型柴油车加速度-油耗分布图

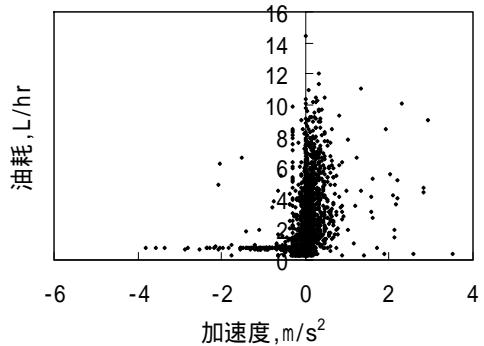


图 4-12 公交柴油车加速度-油耗分布图

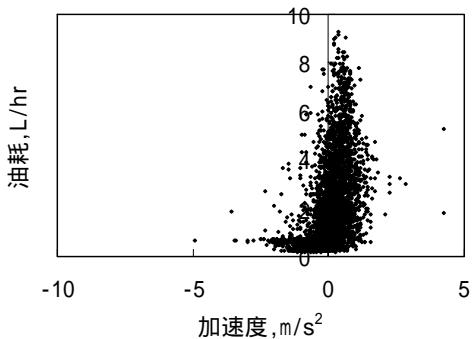


图 4-13 出租柴油车加速度-油耗分布图

6.3 污染物排放的瞬时浓度分布

瞬时加速度-污染物排放分布，该分布旨在探讨瞬时污染物排放与加速度之间的关系，以重型车为例，如图 4-14~图 4-16 所示。

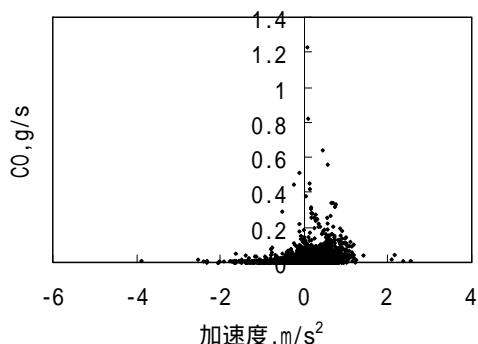


图 4-14 重型车瞬时加速度-CO 分布图

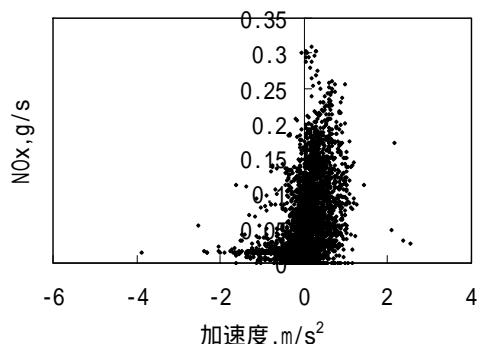


图 4-15 重型车瞬时加速度-NO_x 分布图

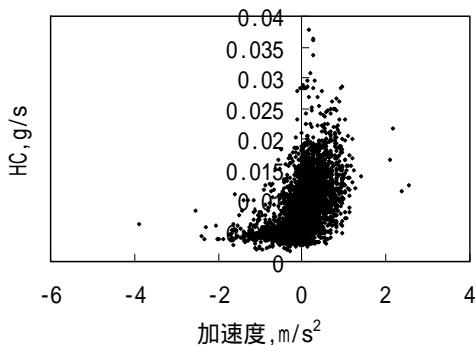


图 4-16 重型车瞬时加速度-HC 分布图

尾气质量流量-污染物瞬时浓度分布，由于测试车辆没有 OBD 装置，无法从车辆直接获取车速信息，故而车速是由 GPS 所测，有 3-5 秒的传输延迟，但是尾气质量流量与车速存在很好的线性关系，因此可以代替车速。如图 4-17~图 4-19 所示。

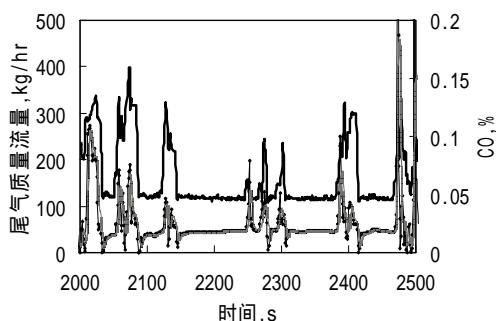


图 4-17 尾气质量流量-瞬时 CO 浓度图

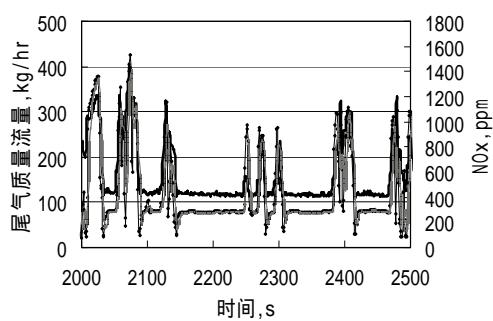


图 4-18 尾气质量流量-瞬时 NOx 浓度图

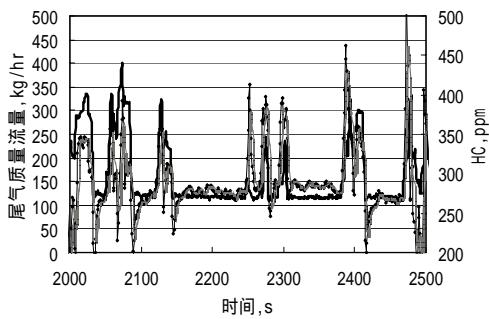


图 4-19 尾气质量流量-瞬时 HC 浓度图

6.4 排放因子

排放因子是反映机动车尾气排放的最基本因素，通常以单位里程的污染物质质量排放来表征。不同车辆之间，以及同一车辆在不同道路、工况下，其排放因子均存在一定差异。这里将计算不同车辆的平均排放因子，并计算标准方差。

6.4.1 卡车

- 城市快速干道

表 4-2 重型柴油车快速干道排放因子 (几吨的?似应为中型) 与美国mobile对照!

项目	CO (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/km)
平均排放因子	4.68	9.38	1.22
标准方差	2.70	2.55	0.28

- 城市主干道

表 4-3 重型柴油车城市主干道排放因子

项目	CO (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/km)
平均排放因子	2.69	8.75	1.65
标准方差	0.27	0.58	0.24

- 城市次干道

表 4-4 重型柴油车城市次干道排放因子

项目	CO (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/km)
平均排放因子	3.19	8.74	1.38
标准方差	0.4	0.67	0.10

6.4.2 公交车

表 4-5 公交柴油车排放因子

项目	CO (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/km)
平均排放因子	3.56	4.75	2.05
标准方差	0.89	1.04	0.52

6.4.3 轻型车

表 4-6 柴油出租车排放因子

项目	CO (g/km)	NOx (g/km)	HC (g/km)
平均排放因子	0.89	2.31	0.66
标准方差	0.25	0.49	0.17

6.5 工况与排放系数汇总

将不同车型的工况以及排放系数进行汇总，结果如表 4-7 ~ 表 4-9 所示：

表 4-7 被测重型柴油空载车辆在不同道路上运行工况的特征参数与排放因子

项目	工况点/个	速度/(km h ⁻¹)				时间比/				行驶里程/km				油耗/(L·h ⁻¹)				燃油经济性/(L·100km ⁻¹)						
		平均	最高	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	怠速	加速	等速	减速									
城市主干道	26724	22.7	68.5	20.4	19.6	32.3	27.6	67.8	47.1	51.1	166.0	1.2	8.1	4.7	1.9					19.1				
快速道路	6376	44.6	84.2	5.6	37.6	30.3	26.5	16.0	30.9	18.2	65.1	1.2	7.9	5.9	3.0					14.9				
城市次干道	23575	19.8	67.1	20.3	22.1	29.7	27.9	48.6	37.5	39.8	125.8	1.0	7.0	3.6	1.5					18.2				
综合道路	61061	22.8	84.2	20.1	22.2	30.4	27.2	143.3	119.9	114.5	377.6	1.1	7.6	4.4	1.8					18.0				
项目	CO排放速率/(mg·s ⁻¹)				HC排放速率/(mg·s ⁻¹)				NOx排放速率/(mg·s ⁻¹)				CO排放因子/(g·km ⁻¹)				HC排放因子/(g·km ⁻¹)				NOx排放因子/(g·km ⁻¹)			
	怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	加速	等速	减速	综合	加速	等速	减速	综合
城市主干道	12.2	72.3	40.7	21.4	8.5	21.1	15.7	9.5	14.2	74.6	47.4	21.8	9.2	4.5	3.1	6.4	2.7	1.7	1.4	2.3	9.5	5.3	3.2	6.8
快速道路	13.9	59.1	38.6	24.6	8.5	17.0	16.2	12.3	14.5	84.5	57.4	31.9	7.1	3.0	2.3	3.9	2.1	1.3	1.1	1.5	10.2	4.5	3.0	5.5
城市次干道	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	
综合道路	11.7	62.2	37.1	19.4	7.5	17.6	14.8	9.9	13.9	71.3	44.7	21.8	8.1	4.2	2.8	5.6	2.3	1.7	1.4	2.1	9.2	5.1	3.2	6.5

表 4-8 被测重型柴油负载车辆在不同道路上运行工况的特征参数与排放因子

项目	工况点/个	速度/(km·h ⁻¹)				时间比/%				行驶里程/km				油耗/(L·h ⁻¹)				燃油经济性/(L·100km ⁻¹)						
		平均	最高	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	加速	等速	减速		
城市主干道	7992	23.3	56.4	17.1	25.1	34.0	23.8	20.8	17.9	12.6	51.3	1.4	13.8	8.0	2.8					32.8				
快速道路	1294	53.1	71.0	0.0	53.9	30.5	15.5	5.4	10.7	3.0	19.1	N/A	15.1	13.5	7.1					24.4				
城市次干道	7916	20.0	59.7	17.5	28.0	31.4	23.0	17.0	16.0	10.7	43.6	1.3	12.6	5.5	1.9					31.2				
综合道路	19146	23.3	71.0	16.7	28.1	32.2	23.1	46.7	47.9	29.1	123.7	1.4	13.3	7.5	2.5					31.0				
项目	CO排放速率/(mg·s ⁻¹)				HC排放速率/(mg·s ⁻¹)				NOx排放速率/(mg·s ⁻¹)				CO排放因子/(g·km ⁻¹)				HC排放因子/(g·km ⁻¹)				NOx排放因子/(g·km ⁻¹)			
	怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	加速	等速	减速	综合	加速	等速	减速	综合
城市主干道	16.1	272.2	134.2	61.1	6.7	22.7	18.6	12.1	15.1	85.2	53.8	23.2	35.5	15.0	9.2	22.3	3.0	2.1	1.8	2.6	11.1	6.0	3.5	7.9
快速道路	N/A	340.0	384.0	134.5	N/A	19.0	19.8	17.3	N/A	92.9	83.2	52.0	24.8	25.1	9.0	22.5	1.4	1.3	1.2	1.3	6.8	5.4	3.5	5.5
城市次干道	11.5	288.2	101.7	31.1	6.3	20.1	15.6	9.7	14.6	75.9	37.7	18.1	42.2	14.1	5.3	23.3	2.9	2.2	1.7	2.6	11.1	5.2	3.1	7.5
综合道路	14.0	273.6	154.7	49.4	6.5	21.4	17.2	11.1	14.8	81.8	49.4	22.2	36.1	17.4	7.5	22.5	2.8	1.9	1.7	2.4	10.8	5.6	3.4	7.4

表 4-9 被测公交柴油车辆运行工况的特征参数与排放因子

工况点/个	速度/(km·h ⁻¹)				时间比/%				行驶里程/km				油耗/(L·h ⁻¹)				燃油经济性/(L·100km ⁻¹)						
	平均	最高	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速						
4188	14.0	42.9	28.0	22.6	30.5	19.0	5.7	7.0	3.7	16.3	1.3	3.7	3.3	1.2			17.4						
CO排放速率/(mg·s ⁻¹)				HC排放速率/(mg·s ⁻¹)				NOx排放速率/(mg·s ⁻¹)				CO排放因子/(g·km ⁻¹)				HC排放因子/(g·km ⁻¹)		NOx排放因子/(g·km ⁻¹)					
怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	加速	等速	减速	综合				
7.9	20.4	18.1	7.3	4.8	11.5	10.4	5.0	10.4	25.9	25.2	10.3	4.6	2.4	1.6	3.6	2.6	1.4	1.1	2.1	5.8	3.4	2.2	4.7

表 4-10 被测柴油出租车在不同道路上运行工况的特征参数与排放因子

项目	工况点/个	速度/(km·h ⁻¹)				时间比/%				行驶里程/km				油耗/(L·h ⁻¹)				燃油经济性/(L·100km ⁻¹)						
		平均	最高	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合	怠速	加速	等速	减速	加速	等速							
城市主干道	5702	20.5	75.6	25.9	16.0	32.8	25.3	14.3	7.4	9.6	1.1	2.9	8.7	0.9	5702.0		20.5							
快速道路	1601	23.1	68.4	13.7	22.3	35.0	29.0	4.3	3.0	3.0	10.3	0.7	2.9	1.8	1.1		7.9							
城市次干道	2515	31.3	77.2	20.9	20.6	30.5	28.1	7.0	5.7	6.0	18.7	0.7	3.3	2.1	1.1		7.0							
综合道路	11161	23.0	77.2	21.2	19.2	33.1	26.5	30.2	19.9	21.4	71.5	1.0	3.0	1.9	1.0		7.9							
项目		CO排放速率/(mg·s ⁻¹)				HC排放速率/(mg·s ⁻¹)				NOx排放速率/(mg·s ⁻¹)				CO排放因子/(g·km ⁻¹)				HC排放因子/(g·km ⁻¹)		NOx排放因子/(g·km ⁻¹)				
项目		怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	怠速	加速	等速	减速	加速	等速	减速	综合							
城市主干道	4.4	7.7	6.4	4.7	3.1	5.0	4.3	3.3	12.7	38.9	23.5	15.5	1.0	0.8	0.7	1.1	0.7	0.5	0.5	0.7	5.1	2.9	2.3	4.3
快速道路	4.2	8.5	9.1	6.2	2.6	4.9	4.0	3.1	11.8	40.8	32.4	22.6	1.1	1.1	1.0	1.1	0.6	0.5	0.5	0.6	5.3	3.9	3.5	4.6
城市次干道	4.0	9.1	8.4	5.5	1.9	4.9	4.7	3.2	15.1	57.5	28.1	21.5	1.0	0.8	0.6	0.9	0.5	0.4	0.4	0.5	6.3	2.5	2.5	4.4
综合道路	4.3	8.1	7.5	5.1	2.8	5.0	4.5	3.3	12.8	41.7	25.2	17.3	1.0	0.8	0.7	1.0	0.6	0.5	0.5	0.6	5.1	2.7	2.4	4.0

7. 小结

与VSP Bin的对应关系！

- (1) 被测车辆在实际道路上运行时，速度、加速度工况点分布随道路类型不同以及车辆类型而各异。从车辆类型看，轻型车车速较快，平均速度可以达到 $23\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，最高速度可达到 $77.2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ；从道路类型看，快速道路车速快，主干道次之，次干道居末。各种道路上不同类型车流的怠速、加（减）速分布特性反映了实际道路的交通状况。
- (2) 车辆燃油消耗、空燃比的变化与发动机输出功率之间的响应，使得车辆在运行过程中表现出不同的速度、加速度工况特性，从而影响尾气排放。且 CO、THC、NOx 的实时排放体积浓度，与车速呈一定的规律变化。
- (3) 即使车辆的加速度相同，但是由于车辆处于不同车速，车辆的 CO、THC、NOx 排放速率不尽相同。实测结果显示，车速越低、车辆加速度越频繁对车辆的燃油经济性和排放越不利。因此，加强交通管理不仅可提高交通运能，同时将对降低机动车尾气排放起到积极的促进作用。
- (4) 被测车辆的排放因子随道路类型、车辆运行状态不同而各异，并且车辆载重对排放因子影响很大。实测结果显示，被测重型车辆空载时在城市综合道路上的CO平均排放因子为 $5.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC为 $2.1\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx为 $6.5\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，而其在满载时CO平均排放因子为 $22.5\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC为 $2.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx为 $7.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ；公交车在其固有路线上CO平均排放因子为 $3.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC为 $2.1\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx为 $4.7\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ ；轻型车CO平均排放因子为 $1.0\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC为 $0.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx为 $4.0\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 。基本反映了被测车辆在实际道路上的排放状况。
- (5) 对柴油车而言，尾气排放除中含有CO、THC和NOx等污染物外，还含有大量对人体健康有害的细微颗粒物 (PM₁₀)，但是由于受仪器和方法所限，本实验研究未能同步开展PM₁₀排放因子的实际测量，该研究有待今后进一步补充与完善。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2001[M]. 北京:中国统计出版社, 2001. 526 - 529
- [2] 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[J]. 环境科学研究, 2000, 13 (4): 22-25
- [3] 清华大学环境科学与工程系, 北京市汽车研究所, 中国环境科学研究院大气研究所, 等. 中国典型城市机动车排放污染控制战略研究-综合报告(世界银行贷款中国环境援助项目B - 9 - 3)[R]. 北京: 1997. 8 - 12
- [4] 上海市环境科学研究院. 减少上海城市车辆排污危害的战略. (世界银行 - 上海城市交通项目II期) [R]. 上海: 1997
- [5] 付立新 , 贺克斌 , 何东全 , 等. MOBILE汽车源排放因子计算模式研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17 (4): 474-479
- [6] 付立新 , 郝吉明 , 何东全 , 等. 北京市机动车污染物排放特征[J]. 环境科学, 2000, 21 (3): 68-70
- [7] 何东全 , 郝吉明 , 贺克斌 , 等. 应用模式计算机动车排放因子[J]. 环境科学, 1998, 19 (3): 7-10
- [8] 祝昌健. 广州市机动车尾气排放系数及污染趋势探讨. 中国环境科学, 1997, 17 (3):216-219
- [9] 李修刚 , 杨晓光 , 王炜 , 等. 用于城市交通规划的机动车污染物排放因子[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(4): 87-91
- [10] 陈长虹 , 方翠贞 , 鲍仙华. 上海市排气污染负荷的估算[J]. 上海环境科学, 1997, 16 (6): 26-29
- [11] 戴利生 , 胡新建 , 顾宇庆. 上海市市区排放测试工况的建立[J]. 上海汽车, 1997, 6: 5-6
- [12] 周泽兴 , 袁盈 , 刘希玲 , 等. 北京市汽车行驶工况和污染物排放系数调查研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20 (1): 48-53
- [13] 邓顺熙 , 史宝忠. 我国轻型汽车污染物排放因子的测试研究[J]. 中国环境科学, 1999, 9(2): 176-179
- [14] 董刚 , 陈良达 , 张镇顺 , 等. 机动车行驶中尾气排放的遥感测量及排放因子估算. 内燃机学报, 2003, 21(2):115-119
- [15] Yi Zhang, Donald H. Stedman, Gray A. Bishop, etc. On-Road Evaluation of Inspection/Maintenance Effectiveness. Environ. Sci. Technol. 1996, 30, 1445-1450
- [16] 胡京南 , 郝吉明 , 傅立新 , 等. 机动车排放车载试验及模型模拟研究. 环境科学, 2004, 25(3):19-25
- [17] 王玮 , 刘红杰 , 丁焰 , 等. 公路隧道实验调查交通来源空气污染方法. 环境科学研究, 2001, 14(4):1-4
- [18] 王玮 , 叶慧海 , 李玉华 , 等. 谭裕沟隧道CO , SO₂ 和NO_x 排放因子研究. 环境科学研究, 2001, 14(4):5-8
- [19] 陈长虹 , 景启国 , 王海鲲 , 等. 重型机动车实际排放特性与影响因素的实测研究. 环境科学学报. 待发表
- [20] CE-CERT. Mobile Heavy-duty Diesel Emissions Laboratory[EB/OL].
<http://www.cert.ucr.edu/emissions/>

第五章 上海市机动车大气污染物排放清单

本研究将应用 IVE 模型来评估上海市机动车污染物排放状况 ,同时结合第三章与第四章所述的上海市机动车行驶工况和车辆技术调查以及排放因子测试等工作 ,更新模型参数 ,实现该模型的本地化 ,计算出上海市机动车大气污染物排放清单。

IVE (International Vehicle Emission Model) 模型是由加州大学 Riverside 分校、工程学院—环境研究与技术中心 (CE-CERT) 全球可持续体系研究组织 (GSSR) 和国际可持续研究中心 (ISSRC) 共同开发的国际机动车排放模型。图 5-1 所示为 IVE 模型的主界面。

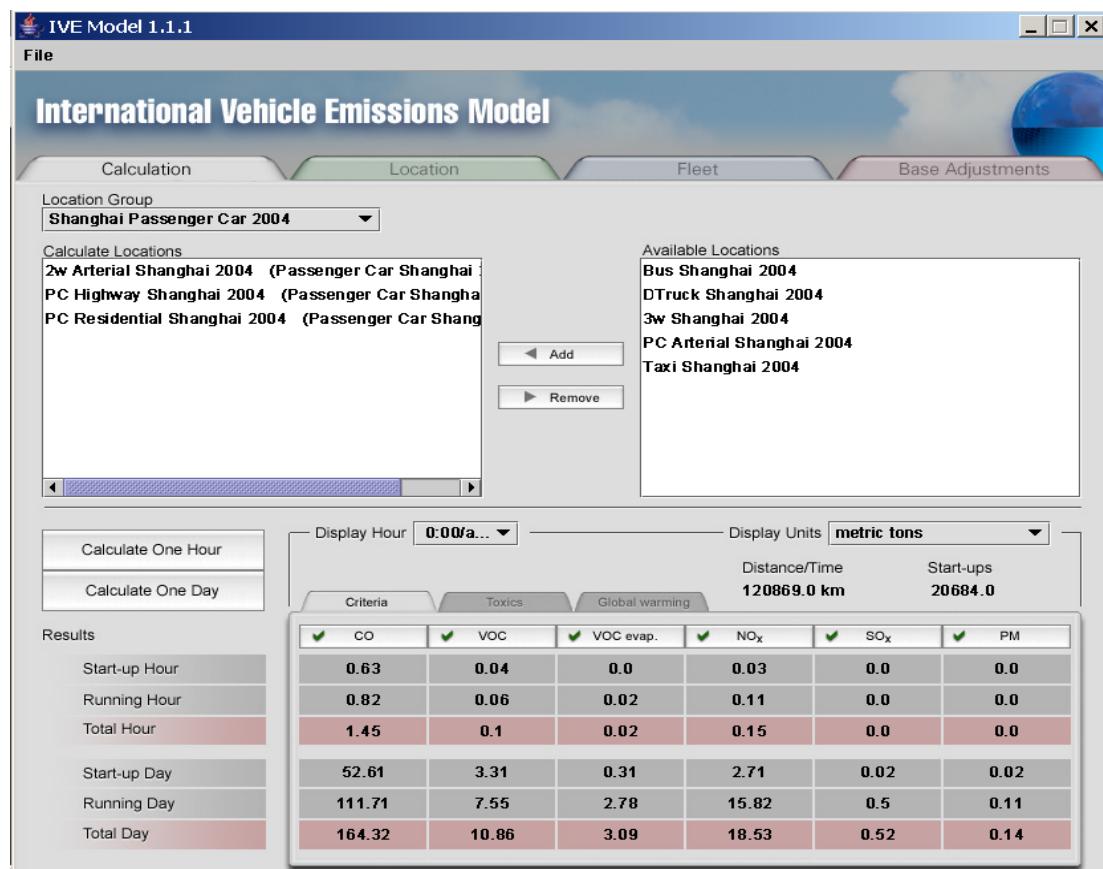


图 5-1 IVE 模型界面

1. IVE 模型结构

图 5-2 所示为 IVE 模型的计算过程。IVE 模型排放计算过程的核心是一个基本排放因子 ,计算污染物排放量时针对各种类型车辆设定一系列的校正因子。利用 IVE 模型研究准确地描述流动源排放清单有三个关键部分 :

- 机动车排放率 (包括各机动车种基本排放因子和校正因子);
- 机动车行驶工况 ;

- 机动车技术分布 (指各种车辆技术所占的比重)

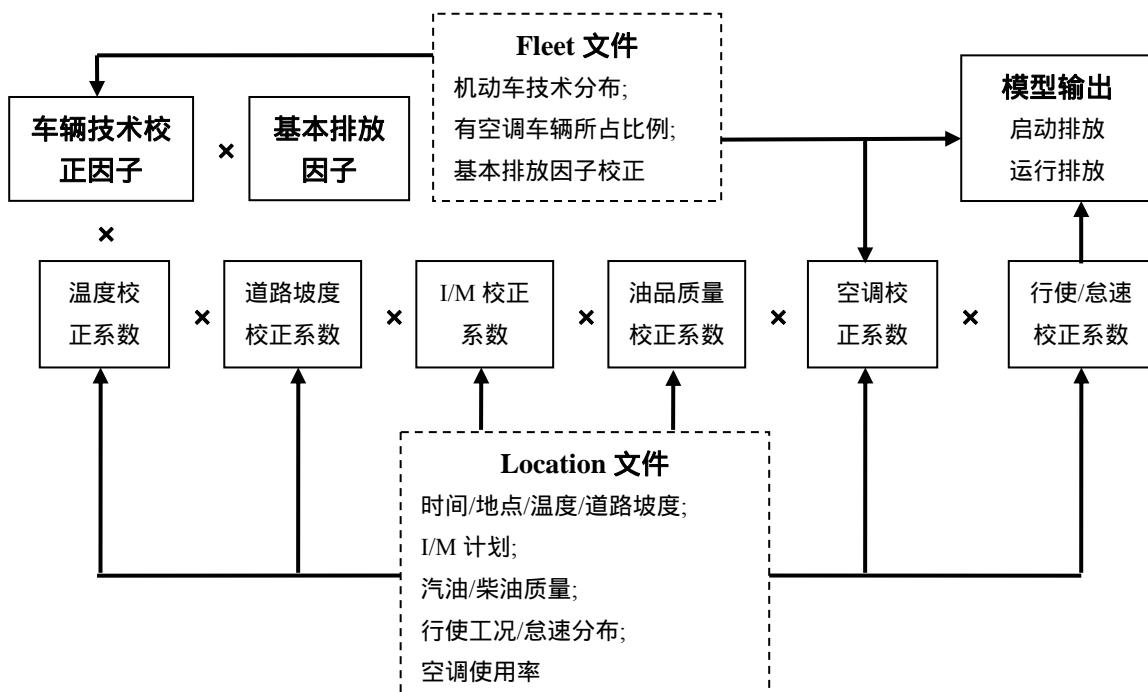


图 5-2 IVE 模型的核心结构。

图 5-1 给出了 IVE 模型的核心结构。IVE 模型的输入参数主要是通过当地的现有信息以及容易收集的数据来量化产生。一旦收集到这些信息，研究适当的流动源清单并针对不同的情景进行修正就比较容易。总体而言，IVE 模型在计算某城市或地区排放量时可以比较全面地对输入参数进行本地化，最后得到当地较准确地机动车污染物排放清单。

2. 计算原理

IVE 模型的排放计算过程是：将每种技术车辆对应的基本排放因子跟其校正因子以及该技术车辆的出行量相乘，即得到总的排放量，校正因子根据不同的车辆技术定义而不同。公式 (1) 所示为模型内部校正排放因子计算过程。：

$$Q_{[t]} = B_{[t]} \times K_{(1)[t]} \times K_{(2)[t]} \times \dots \times K_{(x)[t]} \quad (5-1)$$

式中 $Q_{[t]}$ 表示某种技术的机动车实际排放因子； $B_{[t]}$ 表示该种技术机动车的基本排放因子，其是基于FTP工况下的排放因子；校正系数可以分成以下几类，如表 5-1 所示，表中所列的各种校正系数可以在IVE模型内部的Location文件中进行修改，并保存到模型中。

表 5-1 各种类型校正系数

不同地区	不同的燃油品质 $K_{(Fuel)[t]}$	不同能量或操作 $K_{[dt]}$
环境空气温度 $K_{(Tmp)[t]}$	汽油总体品质	发动机比功率
环境湿度 $K_{(Hmd)[t]}$	汽油含硫量	道路坡度
海拔 $K_{(Alt)[t]}$	汽油含铅量	空调使用情况
I/M计划 $K_{(IM)[t]}$	汽油含苯量	车辆停滞时间分布
基本排放因子校正 $K_{(Cntry)[t]}$	汽油含氧量	
	柴油总体品质	
	柴油含硫量	

由于机动车在启动状态时的排放特性与运行状态不同，而且车辆启动时由于燃烧不完全、发动机温度较低等因素，使得排放较严重，IVE 模型将启动排放和运行排放分开进行计算。公式 (5-2) 根据出行里程的比例和行驶工况对每种技术车辆的校正排放率进行加权。出行里程的比例在车流量调查中获得。在加权后，再将结果跟 LA4 工况平均速度跟所模拟工况的平均速度的比率相乘，同时乘以所行驶里程（此为行驶过程排放）。公式 (5-3) 为启动排放计算过程。

为什么？？

$$Q_{\text{running}} = \bar{U}_{\text{FTP}} \times D / \bar{U}_C \times \sum_t \{f_{[t]} \times Q_{[t]} \times \sum_d [f_{[dt]} \times K_{[dt]}]\} \quad (5-2)$$

$$Q_{\text{start}} = \sum_t \{f_{[t]} \times Q_{[t]} \times \sum_d [f_{[dt]} \times K_{[dt]}]\} \quad (5-3)$$

式中：
 \bar{U}_{FTP} —— LA4 工况下的平均行驶速度，km/h

D —— 机动车行驶距离，km

\bar{U}_C —— 实际行驶工况下的平均速度，km/h

$f_{[t]}$ —— 某种技术的机动车行驶距离占总行驶距离的比例

$Q_{[t]}$ —— 某种技术机动车的实际排放因子，g/km（运行）或g（启动）

$f_{[dt]}$ —— 某种技术机动车不同行驶或怠速状态比例

$K_{[dt]}$ —— 行驶或怠速校正因子（包括空调使用和道路状况的影响）

3. 结果

3.1 机动车出行里程及启动分布

模型计算所需的行驶里程数据通过机动车保有量、各车种车辆分布以及各车种日均行驶里程计算所得。其中机动车保有量及各车种车辆分布数据由车管所（为 2002 年数据）获得，各车种日均行驶里程由本次车辆调查中获得。计算结果见表 5-2。上海全市机动车日行驶里程在 5,085 万公里左右。其中，以轿车和面包车为主的乘用车所占比例最大，为 35.7%；其次为出租车，占到 28%；由于上海市拥有大量的助动车，使得助动车的行驶里程占到总里程的 15%。

表 5-2 上海市各机动车辆类型行驶里程分布

车型	车辆数	日均行驶里程	总日行驶里程	行驶里程比例
	万辆	公里/日	万公里/日	%
Passenger Car	37.1	49	1817.9	35.7
Taxi	4.75	300	1425	28.0
Motorcycle	12.5	12	150	2.9
Moped	63.3	12	759.6	14.9
Bus	3.23	130	419.9	8.3
Truck	5.7	90	513	10.1
Total	126.58		5,085	100

全天不同时间段道路上的车流量不同，车辆在各个时间段的出行里程也不相同。通过对上海市各种道路、各个时间段车流量进行加权计算（详见第三章），可得全市小时车辆出行里程分布。由图 5-3 可以看到，上海市车辆出行分别在上午 8:00 段、下午 14:00 段以及 17:00 段达到峰值。具体结果见表 5-3。

右侧两列为小时启动次数分布（详见第三章）。

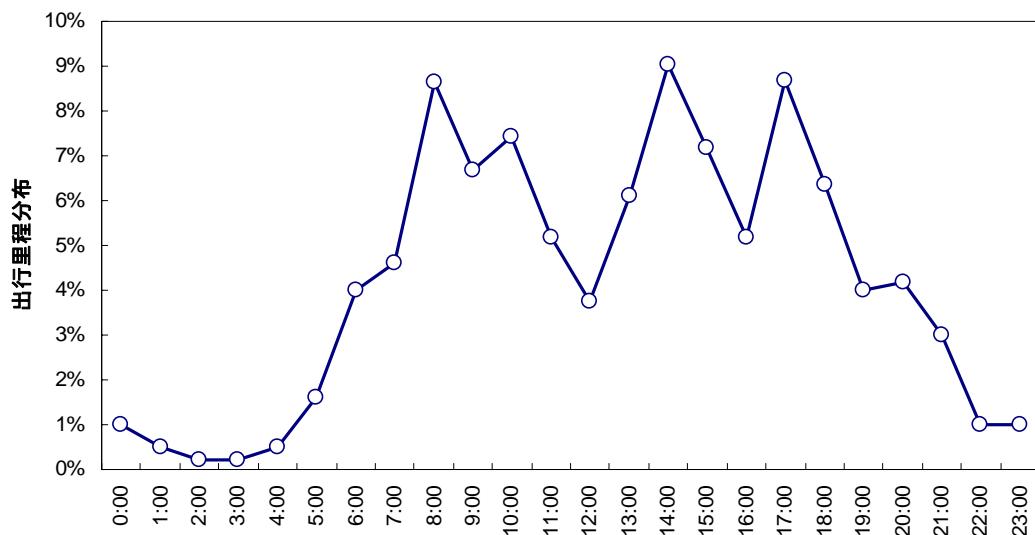


图 5-3 上海市车辆出行里程分布

主要问题：

- (1) 没有根据实测数据对VSB进行验证
- (2) 公式解释有问题
- (3) 技术对应和车龄是否准确

表 5-3 上海市车辆出行里程与启动次数的时间分布

时间	小时车辆出行 里程分布	小时车辆出行 里程(公里)	小时启动次 数分布	小时启动次数
0:00	1%	508540	1%	93410
1:00	1%	254270	1%	93410
2:00	0%	101708	1%	43112
3:00	0%	101708	1%	43112
4:00	1%	254270	1%	79039
5:00	2%	813664	1%	79039
6:00	4%	2034160	6%	431122
7:00	5%	2344870	6%	431122
8:00	9%	4388201	8%	596385
9:00	7%	3398053	8%	596385
10:00	7%	3779812	6%	416751
11:00	5%	2640770	6%	416751
12:00	4%	1907274	6%	395195
13:00	6%	3111532	6%	395195
14:00	9%	4594583	6%	409566
15:00	7%	3646340	6%	409566
16:00	5%	2639319	7%	524531
17:00	9%	4408833	7%	524531
18:00	6%	3225152	5%	352083
19:00	4%	2034700	5%	352083
20:00	4%	2123541	2%	172449
21:00	3%	1525620	2%	172449
22:00	1%	508540	1%	86224
23:00	1%	508540	1%	86224
	总计	50,854,200		7,185,360

3.2 上海市机动车污染物排放结果

3.2.1 污染物排放的时间分布

通过 IVE 模型计算，得到上海市各机动车污染物（包括 CO、VOC、NOx、PM）的排放结果。

图 5-4 所示为上海市机动车 CO 排放的模型计算结果。其中黄色区域为运行过程排放；紫色区域为启动排放结果。

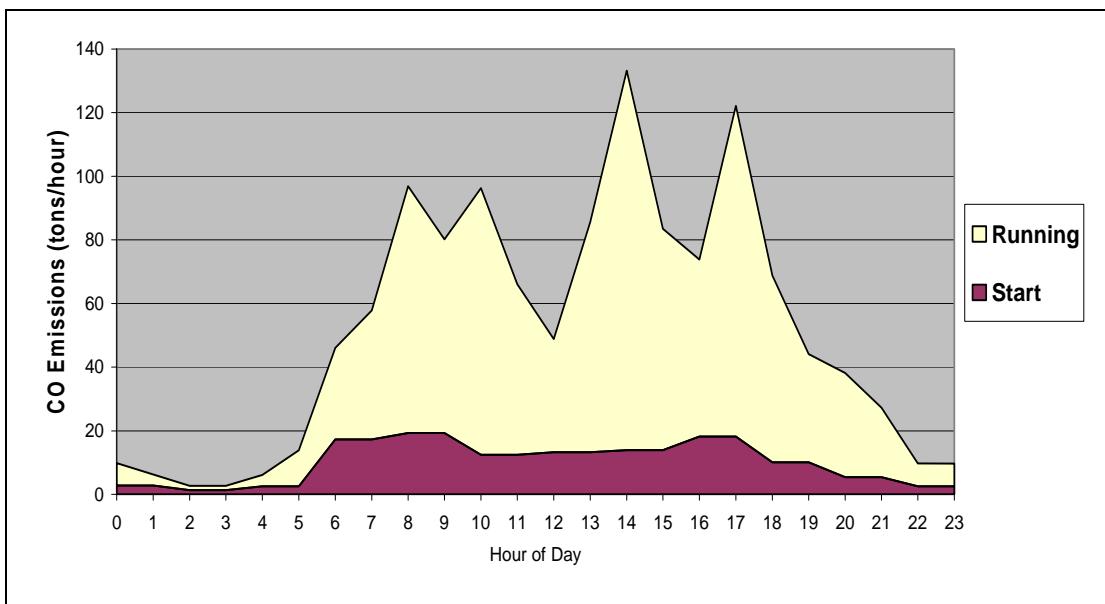
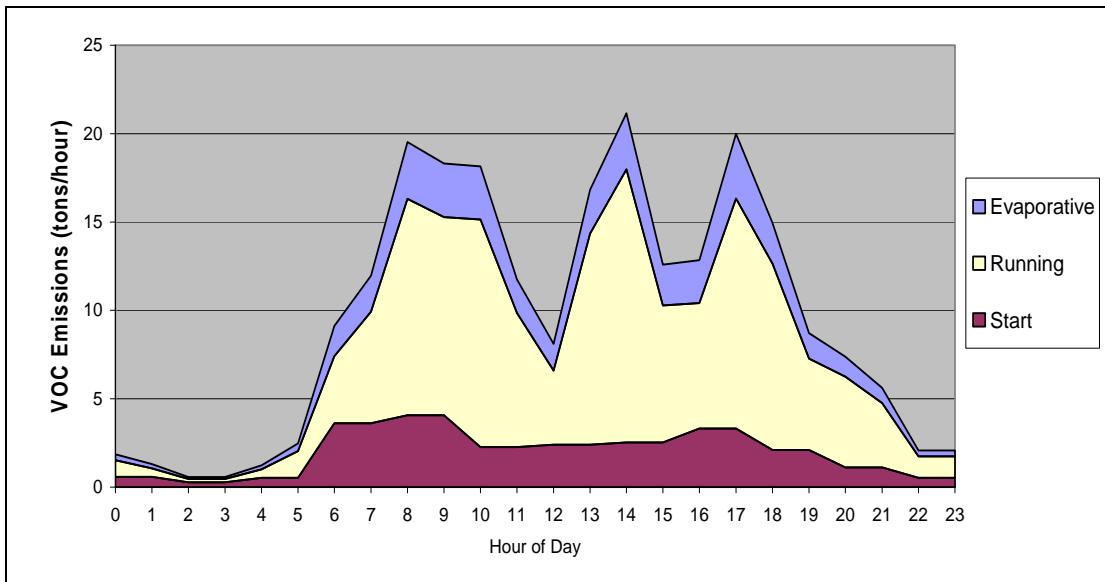


图 5-4 上海市机动车 CO 排放结果

上海市机动车 CO 日排放量为 1154 吨，日均排放率（包括运行排放和启动排放）为 22.6g/km。由图可见，受车流分布影响，全天 CO 排放主要集中在上午 08:00、下午 15:00 和 17:00 三个时间段，在中午 12:00 时出现最低谷。同时，车辆启动虽然时间很短，但对 CO 的排放贡献很大，特别是上午，由于该时段车辆冷启动次数较多，启动排放占到 1/3 左右。

图 5-5 所示为上海市机动车 VOC 排放的模型计算结果。计算时考虑了燃料蒸发所产生的 VOC（蓝色区域）。



上海市机动车 VOC 日排放量为 176 吨，日均排放率（包括运行排放、启动排放和蒸发排放）为 3.46g/km。由图可见，全天 VOC 排放的时间分布与 CO 排

放相似，主要集中在上午 08:00、下午 15:00 和 17:00 三个时间段，在中午 12:00 时出现最低谷。由于 VOC 与 CO 一样主要是燃料燃烧不完全的产物，所以启动过程中排放的 VOC 贡献很大，同时蒸发排放的比重也比较大。

图 5-6 所示为上海市机动车 NO_x 排放的模型计算结果。NO_x 日排放量为 182 吨，日均排放率为 3.57g/km。由图可见，启动时 NO_x 的排放与 CO、VOC 比较贡献很小，这是由于车辆启动时往往燃烧不完全，燃料型 NO_x 排放少；而且发动机由于激冷，使温度降低，不易高温型 NO_x 产生。

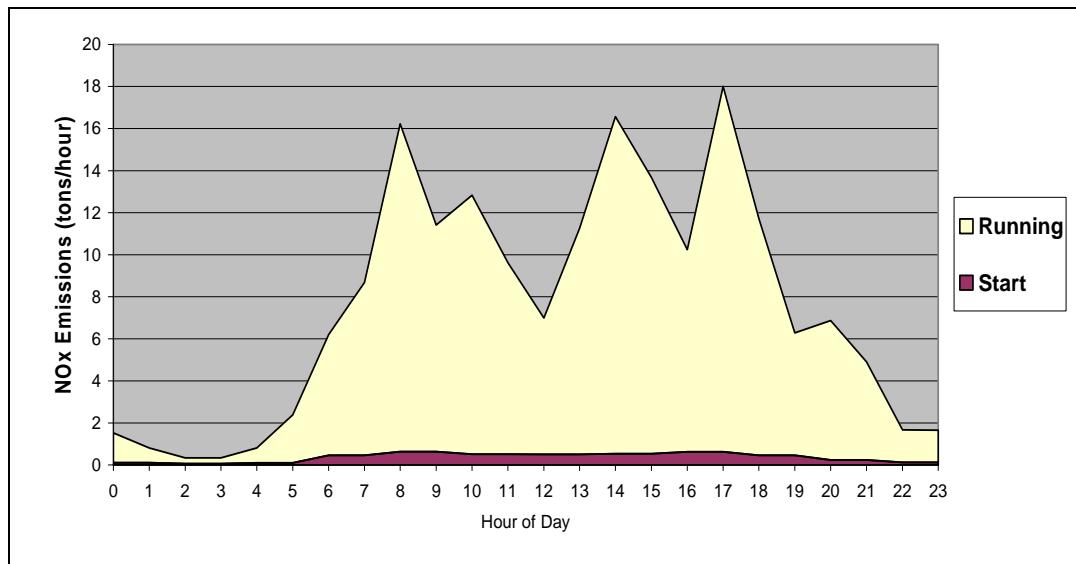


图 5-6 上海市机动车 NO_x 排放结果

图 5-7 所示为上海市机动车 PM 排放的模型计算结果。PM 日排放量为 4.54 吨，日均排放率为 0.089g/km。机动车排放的颗粒物主要是发动机中未能燃烧的燃料颗粒，这些颗粒在车辆启动时的以黑烟或蓝烟等形式大量排出，对人体健康具有相当大的危害。

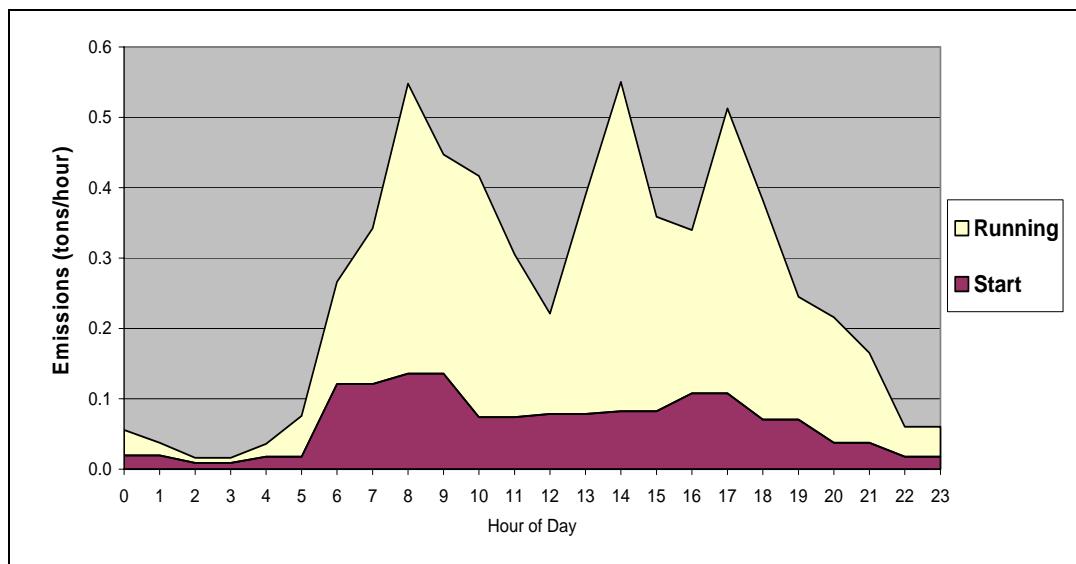


图 5-7 上海市机动车 PM₁₀ 排放结果

3.2.2 污染物排放清单

表 5-4 所示为上海市机动车污染物的排放清单。车型主要有乘用车 (Pass. Car)、出租车 (Taxi)、卡车 (Dtruck)、巴士 (Bus)、摩托车 (Motorcycle) 以及助动车 (Moped) 等几大类。由表可见，上海市机动车全年CO排放量约 42 万吨；VOC年排放 6.4 万吨；NOx年排放 6.6 万吨；PM年排放在 0.17 万吨左右。CO₂年排放 753 万吨左右。

表 5-4 上海市机动车污染物排放清单

车型	污染物排放								车辆活动水平			
	CO		VOC		NOx		PM		CO ₂			
	万吨/年	%	万吨/年	%	万吨/年	%	万吨/年	%	万吨/年	%		
Pass. Car	9.0	21	0.8	13	1.1	16	0.008	5	299	40	37.1	66.35
Taxi	11.9	28	1.0	16	0.9	14	0.005	3	178	24	4.75	52.01
Dtruck	6.1	15	0.5	8	1.6	24	0.054	32	102	13	12.5	5.48
Bus	5.7	14	0.6	9	2.8	43	0.035	21	150	20	63.3	27.73
Motorcycle	1.6	4	0.4	7	0.1	1	0.005	3	7	1	3.23	15.33
Moped	7.7	18	3.1	48	0.2	2	0.060	36	18	2	5.7	18.72
Total	42.1	100	6.4	100	6.6	100	0.166	100	753	100	126.58	185.62

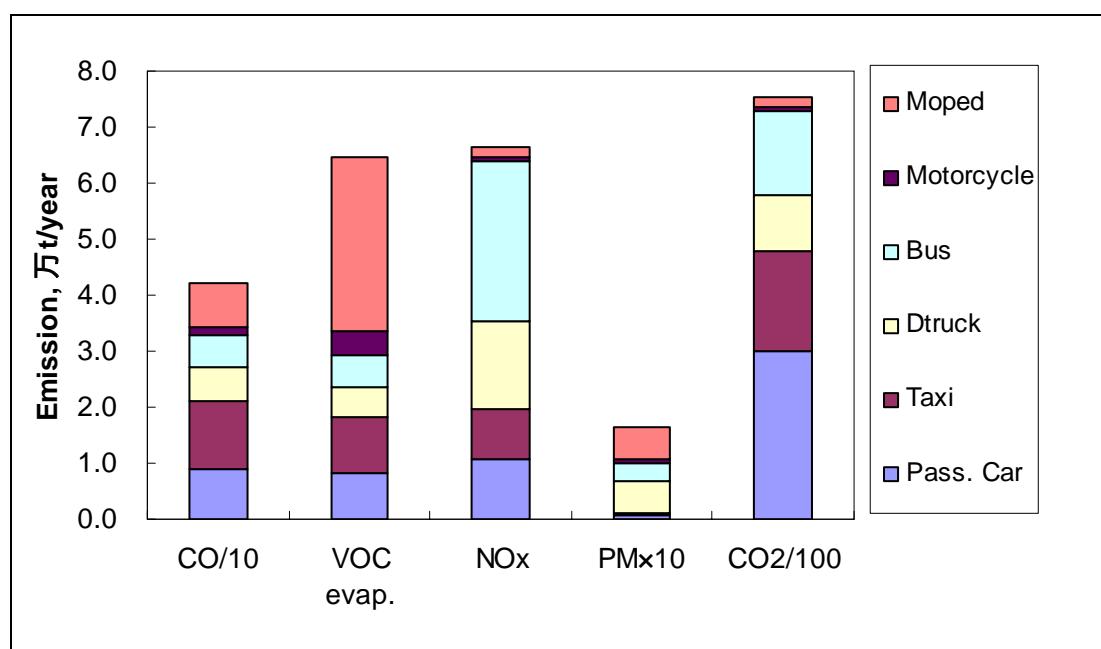


图 5-8 上海市机动车污染物排放清单

3.2.3 各车种排放贡献率

分车辆类型的污染物排放应污染物种类不同而异。图 5-8 给出了上海市各种机动车类型的污染物排放分担率。上海市机动车CO的排放主要来自乘用车、出租车和助动车等轻型交通工具，其中出租车占总排放量的 29%，乘用车占 21%，

助动车占将近 18%；由于 2004 年上海市尚存在将近 20 万辆燃油助动车，使得助动车成为机动车 VOC 排放的主要来源，占 48%，其次为乘用车和出租，分别占 12% 和 16%；NOx 的排放以重型车为主，主要是公交巴士和卡车，分别占 42% 和 24%，值得一提的是公交巴士和卡车在全市车辆行驶里程中的比例仅占 18.4%，说明重型车相对其他各种车型而言，污染状况更为严重；PM 的排放以重型柴油车为主，公交巴士和卡车等重型车分别占总 PM 排放量的 21% 和 33%，除此之外，由于二冲程燃油助动车的燃烧效率差，启动和运行时往往伴随大量的未燃烧油滴以蓝烟的形式排出，助动车在 PM 总排放量中也占有很大的比重，约 35% 左右；CO₂ 的排放主要来自乘用车，占总排放量的 40%，其次为出租车和公交巴士，分别占 24% 和 20%。

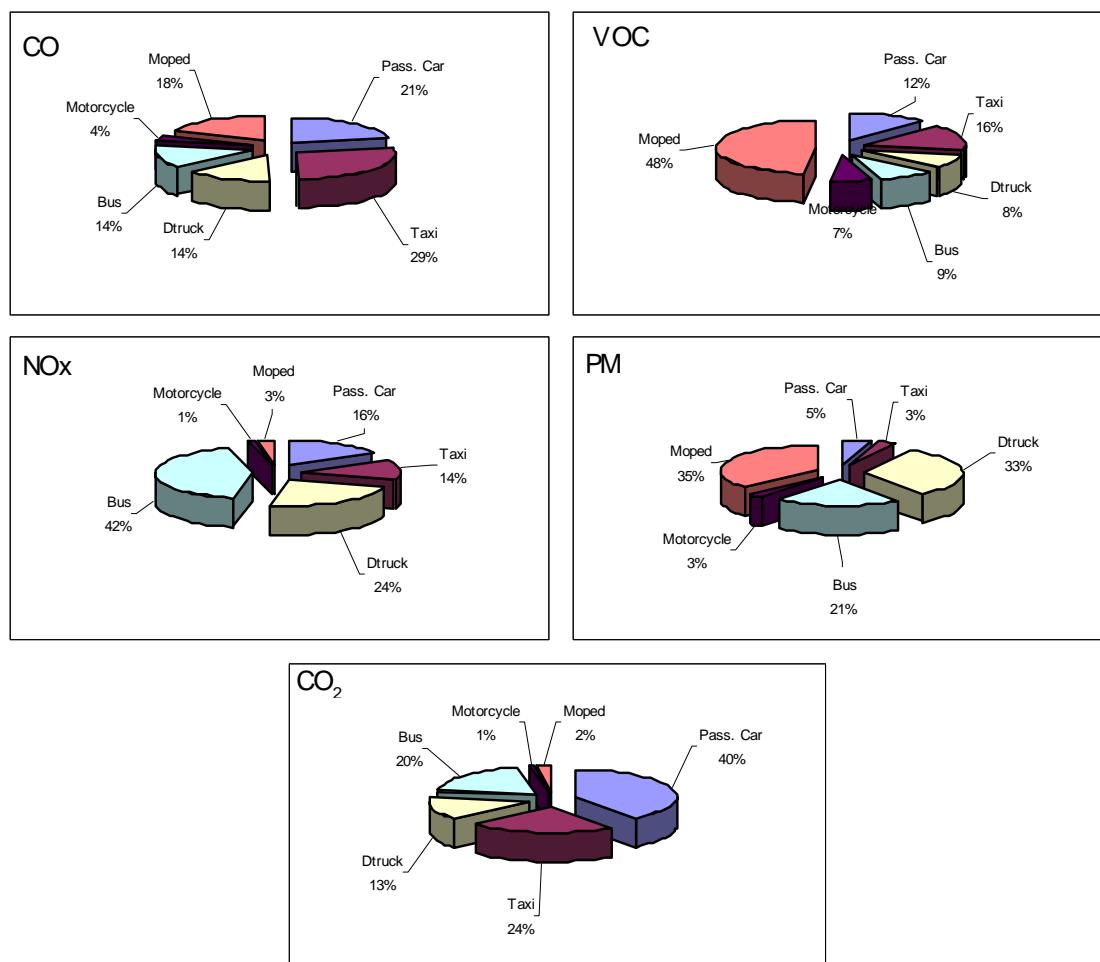


图 5-9 上海市各车型污染物排放比重

4. 小结

本章主要利用 IVE 模型计算了上海市机动车污染物的排放清单，以评估上海市机动车的污染物排放现状。

上海市机动车 CO、VOC、NOx、PM 以及 CO₂ 年排放量分别达到 42.1 万吨、6.4 万吨、6.6 万吨、0.17 万吨和 753 万吨，其中 CO、VOC 以及 PM 有将近 20% ~

30%来自启动排放；全天的排放主要集中在上午 8:00 段以及下午 15:00 和 17:00 段的上下班高峰时期，这些时间段由于车流量大，路况较差，使其排放量占到排放总量的 80%~90%左右；

从各种机动车对污染物排放的贡献率来看，助动车和重型车（包括公交巴士和卡车）的污染水平最高，这些车辆在全市机动车的行驶里程中分别占到 14.9%、8.3% 和 10.1%，但却造成 46% 的 CO 排放，65% 的 VOC 排放，69% 的 NOx 排放以及 89% 的 PM 排放，已经成为上海市交通污染排放的主要来源，将对全市大气环境质量和人体健康产生巨大的影响。轻型车如乘用车、出租车和摩托由于车龄较新，发动机及尾气排放技术也较为先进，其整体排放水平较低。

从上海市交通可持续发展的观点来看，燃油助动车这一“移动的烟囱”必须加以淘汰，或以燃气或者电动助动车作为替代；重型车应逐步实现清洁化，严化重型车排放标准，发展高性能、低污染、大吨位的重型运输车。

引出重型车控制Scenario在第二阶段项目中！

第六章 环境空气质量状况

1. 大气污染监测点位分布

上海市的大气环境监测网络由市级和区县级 21 个自动监测站和 23 个手工监测点组成。目前本市的环境空气质量自动监测系统由 21 个监测子站和 1 个中心站组成，其中 10 个国控点（含 1 个对照点），8 个市控点，2 个监控点，1 个对照点，遍布全市 8 个区，分别代表大中型工业区、小工业集中地、城区居民区、文教区、商业和交通繁忙区、混合区、清洁对照点等不同的功能特点。

根据区域不同、监测项目不同的原则布设化学法监测点，同时考虑数据的代表性、可比性和连续性。全市布设二氧化硫、二氧化氮、氮氧化物、总悬浮颗粒物监测点各 23 个。

各监测项目、点位分布情况见表 6-1。

表 6-1 上海市环境空气质量监测点位分布

监测方法	各区域采样点数（有动力采样点）			
	城区	郊区	郊县	总计
自动监测	7	12	2	21
手工监测	11	9	3	23
总计	18	21	5	44

2. 大气污染监测与频率与监测方法

空气质量日报、预报监测网络中心通过有线传输的方式，对全市 21 个环境空气质量自动监测站的监测数据进行远程实时监控，确保监测数据的真实性、准确性和时效性；并且以空气质量日报、预报的形式，通过各种媒体及时向公众公布上海市空气质量现状和预测。

监测方法按照《环境空气质量标准》和国家环境保护局编制的《空气和废气监测分析方法》，见表 6-2。

表 6-2 大气污染监测方法

监测对象	标准方法	方法代号	最低检出浓度或测定范围
一氧化碳	非分散红外法	GB 9801-88	0.3 mg/m ³
氮氧化物	Saltzman 法	GB/T 15436-1995	0.015 mg/m ³
二氧化氮	Saltzman 法	GB/T 15435-1995	(0.015 ~ 2.0) mg/m ³
臭氧	靛蓝二磺酸钠分光光度法	GB/T 15437-1995	(0.030 ~ 1.200)mg/m ³
	紫外光度法	GB/T 15438-1995	2.14 μg/m ³
二氧化硫	甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法	GB/T 15262-94	0.007 mg/m ³

总悬浮颗粒物 (TSP)	重量法	GB/T 15432-1995	0.001 mg/m ³
可吸入颗粒物(PM10)	β射线法	GB 6921-86	1 μg/m ³
降尘	重量法	GB/T 15265-94	0.2 t/km ² ·30d

3. 环境空气质量状况

统计上海市环境状况公报中的大气污染监测数据，1990 年至 2003 年上海市环境空气质量有如下变化：1990 年至 1993 年，大气污染属于煤烟型污染，主要污染物是二氧化硫和烟尘；1994 年至 1996 年，大气污染趋向于以煤烟型为主的复合型污染，主要污染物为降尘、总悬浮颗粒物 (TSP) 和二氧化硫。

自上世纪 90 年代后期起，上海市围绕大气污染控制先后启动了“二氧化硫总量控制”、“重点污染区域综合整治”、“一控双达标”、“跨世纪绿色工程”和“建设基本无燃煤区”等多项措施，使上海以SO₂和TSP为代表的煤烟型污染逐年缓解，大气污染开始转变为煤烟型和石油型并重的复合型污染，氮氧化物成为主要污染物，其次为总悬浮颗粒物、二氧化硫和降尘。

2002 年起，上海市在继续推进煤烟型污染控制工作的同时，加强了机动车污染控制，并于 2003 年 3 月 1 日起新车实施了欧 II 标准，在用车 I/M (检测/维护) 工作积极推进，基本建成了 I/M 检测中心站，并启动了燃油助动车的淘汰工作，通过这些措施的实施，中心城区机动车尾气污染上升的趋势开始得到控制。然而，由于机动车保有量的增长速度明显快于实施欧洲 II 标准产生的政策效果，因此与机动车排放相关的大气污染并未得到明显改善。上海市环境状况公报的监测数据显示，目前全市大气污染以可吸入颗粒物和 NO_x 为主。由于颗粒物污染突出，细粒子污染严重，上海市大气能见度尚未得到明显改善。

1990 ~ 2003 年上海市 SO₂、NO_x、TSP 、PM₁₀年平均浓度数据如表 6-3 所示。

表 6-3 上海市 SO₂、NO_x、TSP 、PM₁₀年平均浓度数据 (单位 : mg/m³)

	SO ₂		NO _x		TSP		PM ₁₀
	全市	城区	全市	城区	全市	城区	城区
1990	0.048	0.095	0.040	0.062	0.284	0.358	
1995	0.032	0.053	0.051	0.073	0.237	0.246	
2000	0.022	0.045	0.056	0.090	0.155	0.156	0.100
2003	0.039	0.043	0.070	0.082	0.156	0.140	0.097

3.1 全市 NO_x、PM₁₀年际变化

图 6-1 所示为 1990 年 ~ 2003 年上海市 NO_x 浓度年际变化。由图可见，NO_x 浓度在 90 年代初期到中期呈上升的趋势，并且这一上升趋势在城区尤其明显，2003 年全市 NO_x 浓度与 1990 年相比较，上升了 75%。这种变化趋势与这一阶段上海市

机动车保有量的增加是密不可分的。1998年至2003年，通过城市功能调整、能源结构与产业结构的调整，以及实施了严格的机动车排放标准，使得中心城区NO_x浓度的上升趋势得到控制，但正是由于这些调整和城市机动化的普遍提高，以及政策力度相对滞后，使得郊区NO_x浓度上升，全市NO_x平均浓度仍有增加。

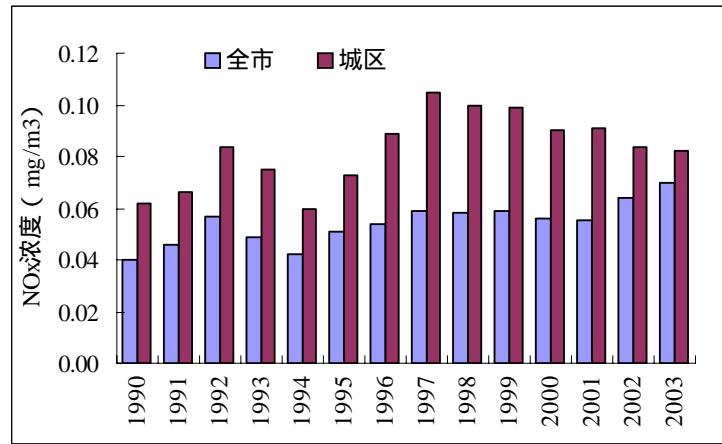


图 6-1 上海市大气中 NO_x 浓度年际变化

1990~2003年上海市大气中总悬浮颗粒物(TSP)得到有效控制，呈逐年下降的趋势，如图6-2所示，2003年TSP浓度与1990年比较下降了61%。2000年至2003年，PM₁₀浓度年际变化如图6-3所示，2002年上海市城区PM₁₀浓度为历年的最高值，为0.108 mg/m³。

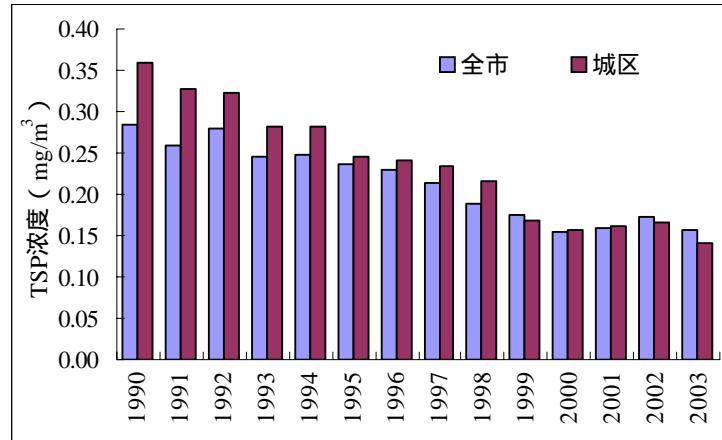
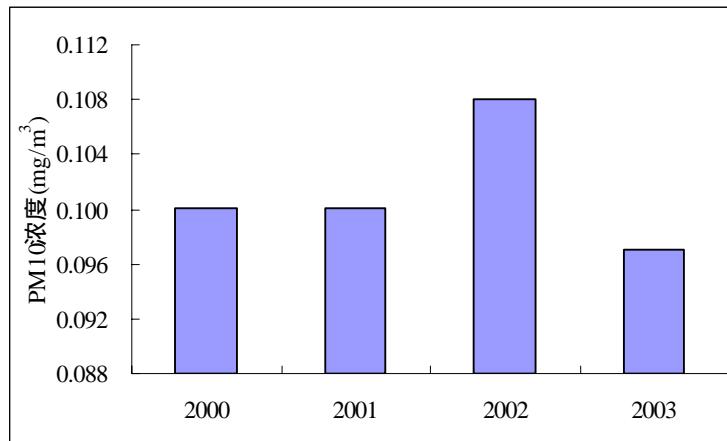


图 6-2 上海市大气中 TSP 浓度年际变化

图 6-3 上海市大气中 PM₁₀ 浓度年际变化

3.2 全市 NOx、PM₁₀ 污染的季节性变化

图 6-4 所示为 1990 年至 2002 年全市 NOx 浓度的季节变化。由图可见，3、4、5 月为第一季度，即春季，12、1、2 为第四季度，即冬季。从季节变化看，冬季浓度最高，夏季浓度最低。以 2002 年为例，第四季度 NOx 浓度为 0.081 mg/m³，第二季度浓度为 0.056 mg/m³。PM₁₀ 浓度的季节变化和 NOx 略有不同（见图 6-5），浓度最高值出现在第一季度，即春季，这一季节 PM₁₀ 的高浓度值与受北方沙尘天气的影响有关。2001 年和 2002 年第一季度 PM₁₀ 浓度分别为 0.126 mg/m³ 和 0.142 mg/m³，分别是当年第三季度 PM₁₀ 浓度的 2.1 和 1.8 倍。

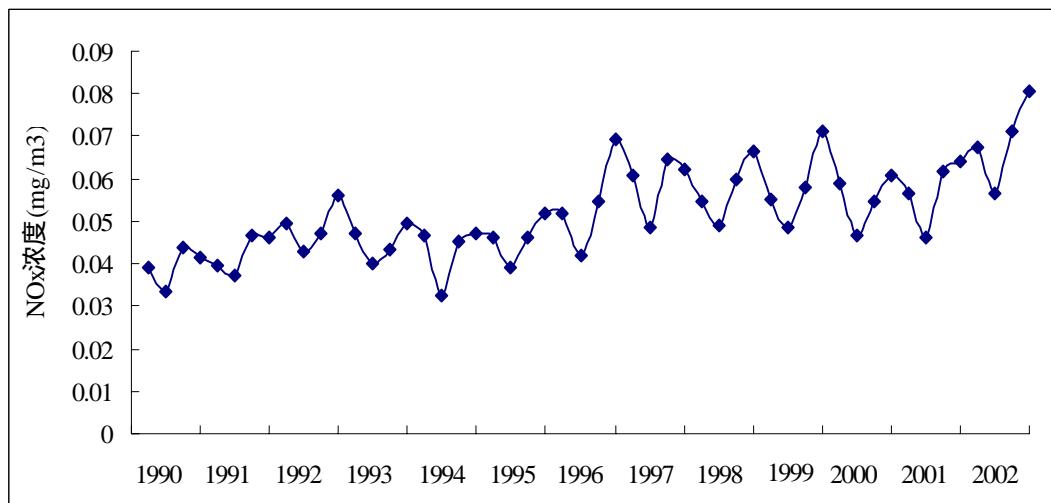
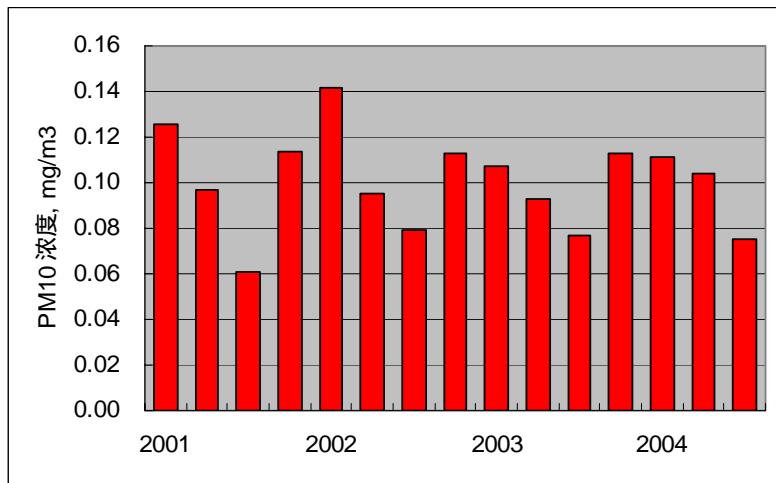
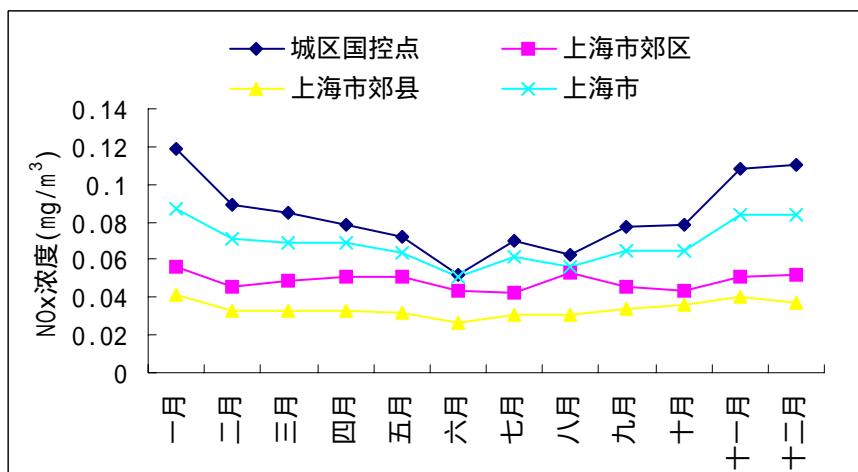


图 6-4 上海市 NOx 浓度季节变化

图 6-5 上海市大气中PM₁₀浓度季节变化

3.3 全市 NO_x 污染的区域分布

根据上海市环境监测中心的监测资料，上海市 2002 年城区国控点、郊区、郊县以及上海市NO_x浓度月平均值如图 6-6 所示。NO_x年平均值城区>郊区>郊县，浓度分别为，城区国控点 0.084 mg/m³，郊区 0.049 mg/m³，郊县 0.034 mg/m³，上海市 0.069 mg/m³。

图 6-6 2002 年上海市 NO_x 浓度月平均值

3.4 主要交通干线的污染状况

根据 2004 年 10 月 9 日至 2004 年 11 月 12 日上海市环境监测中心在 18 条交通干线的交通路口监测结果显示：

NO 的小时浓度在 0.004 mg/m³ (外青松监测点) ~ 0.812 mg/m³ (世纪大道监测点) 之间波动，小时平均浓度 0.017 mg/m³ (外青松监测点) ~ 0.346 mg/m³ (延安东路监测点)；

NO₂ 的小时浓度在 0.022 mg/m³ (外青松监测点) ~ 0.250 mg/m³ (广中路监测点) 之间波动，小时平均浓度 0.041 mg/m³ (外青松监测点) ~ 0.172 mg/m³ (万体馆监

测点)；

NO_x的小时浓度在0.026 mg/m³(外青松监测点)~0.954 mg/m³(世纪大道监测点)之间波动，小时平均浓度0.059 mg/m³(外青松监测点)~0.469 mg/m³(延安东路监测点)，18个监测点NO_x小时平均浓度变化如图6-7所示，其中16个监测点超过国家标准，大部分道路污染状况严重。

PM₁₀的小时浓度在0.005 mg/m³(外青松监测点)~1.199 mg/m³(虹梅路监测点)之间波动，小时平均浓度0.075 mg/m³(源深路监测点)~0.326 mg/m³(虹梅路监测点)，各监测点PM₁₀小时平均浓度如图6-8所示，虹梅路监测浓度是源深路监测浓度的4.3倍。

CO的小时浓度在2.172 mg/m³(万体馆监测点)~12.209 mg/m³(延安东路监测点)之间波动，小时平均浓度3.023 mg/m³(源深路)~5.982 mg/m³(延安东路)，均未超过国家标准。

THC的小时浓度在1.896 mg/m³(中山公园监测点)~5.656 mg/m³(江苏路监测点)之间波动，小时平均浓度2.371 mg/m³(外青松监测点)~4.108 mg/m³(四平路)。

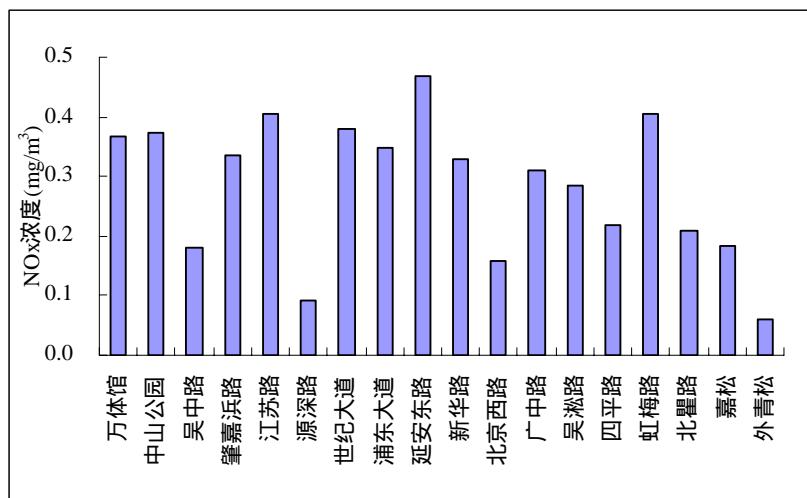


图6-7 各交通干线NO_x小时平均浓度

浦东的世纪大道和浦东大道的NO_x监测浓度与万体馆和中山公园监测浓度相当，但PM₁₀监测浓度远远低于万体馆和中山公园浓度。

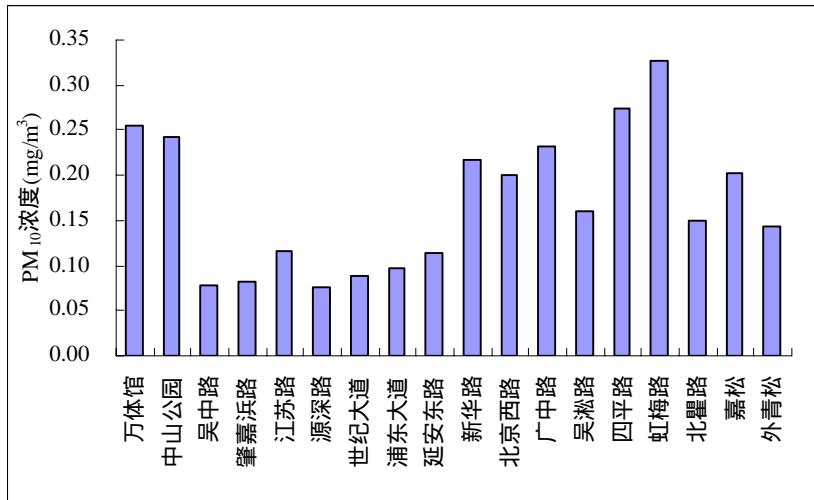
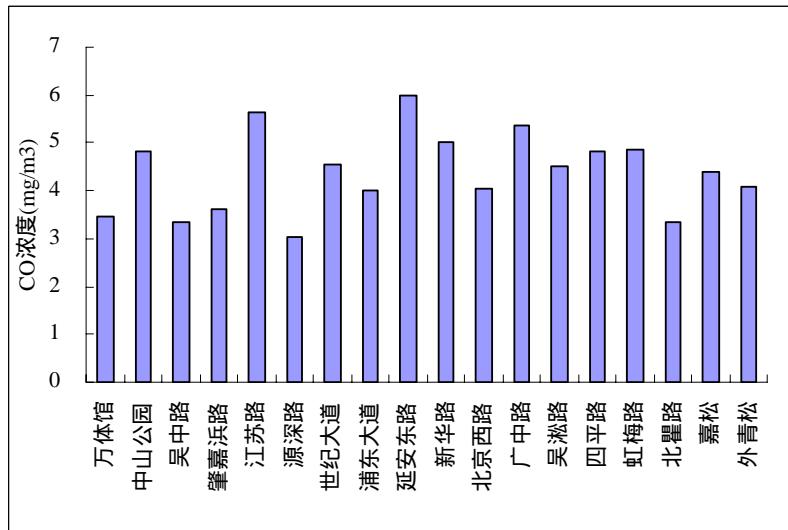
图 6-8 各交通干线 PM₁₀ 小时平均浓度

图 6-9 各交通干线 CO 小时平均浓度

图 6-10 和图 6-11 分别给出了污染物小时平均浓度较高的监测点，其大气污染浓度的日变化规律。由图可见，延安东路和虹梅路监测点的 NO_x 浓度和 CO 浓度较高，小时平均浓度分别高达 0.40 mg/m^3 以上和 4.5 mg/m^3 以上，PM₁₀ 的小时平均浓度保持在 0.100 mg/m^3 以上。如图所示，交通干线附近的大气污染与交通量有着极其紧密的联系，在早晨交通高峰和繁忙时期，即上午 6:00-9:00，交通干线附近的 NO_x、CO 和 PM₁₀ 浓度将急剧升高。此外在晚间逆温形成时，地面大气污染开始出现堆积，交通污染程度开始加剧，到晚间 22:00 左右，交通污染出现副高峰。

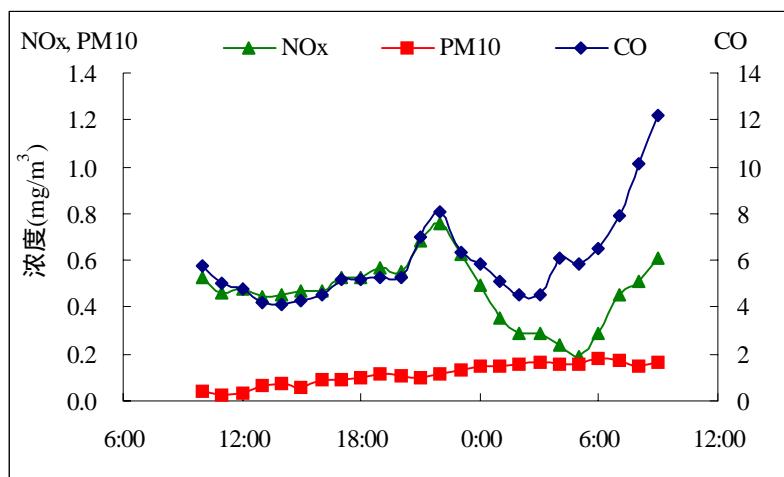


图 6-10 2004 年 10 月 30 日-31 日延安东路监测点污染物浓度日变化

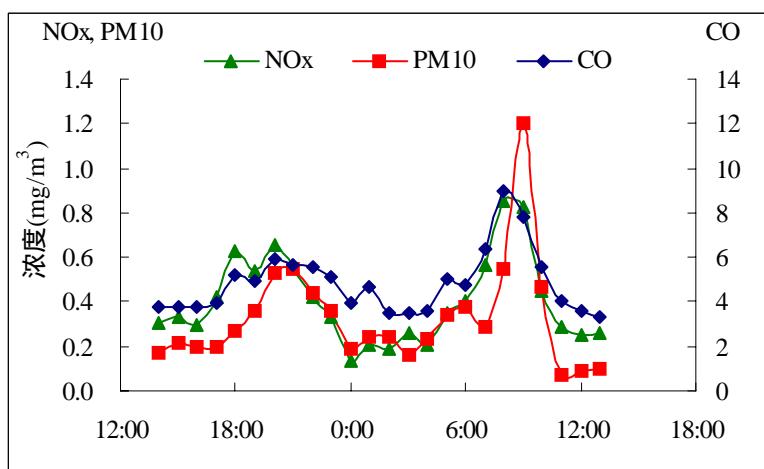


图 6-11 2004 年 11 月 7 日-8 日虹梅路监测点污染物浓度日变化

表 6-4 列出各种污染物的环境空气质量二级标准，18 个监测点的 NO、NO₂、NOx、CO、THC 和 PM₁₀ 的监测结果如表 6-5 ~ 表 6-22 所示，并将结果与国家标准相对照，计算超标倍数和小时浓度值超标率。NO₂ 小时平均浓度超标率在 0% ~ 83% 之间，NOx 小时平均浓度超标率在 0% ~ 100% 之间，其中超标率大于 70% 的监测点有 13 个，CO 小时平均浓度仅延安东路监测点超标率 8%，其他各点均未超标。

表 6-4 环境空气质量二级标准 (GB3095-1996)

国家二级标准	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时平均(mg/m ³)	N/A	0.12	0.15	10.00	N/A	N/A
日平均(mg/m ³)	N/A	0.08	0.10	4.00	N/A	0.15

表 6-5 万体馆监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.399	0.244	0.614	5.034	3.269	0.331
小时最小值(mg/m ³)	0.005	0.086	0.091	2.172	1.950	0.112
小时平均值(mg/m ³)	0.194	0.172	0.366	3.462	2.678	0.254
小时最大浓度超标倍数	N/A	2.0	4.1	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	1.4	2.4	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	83%	83%	0%	N/A	N/A

表 6-6 中山公园监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.531	0.233	0.646	6.526	3.266	0.373
小时最小值(mg/m ³)	0.043	0.113	0.207	3.222	1.896	0.114
小时平均值(mg/m ³)	0.230	0.143	0.373	4.839	2.664	0.242
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.9	4.3	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	1.2	2.5	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	79%	100%	0.%	N/A	N/A

表 6-7 吴中路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.180	0.106	0.272	5.035	4.157	0.179
小时最小值(mg/m ³)	0.035	0.059	0.094	2.709	2.485	0.033
小时平均值(mg/m ³)	0.093	0.087	0.180	3.332	2.849	0.079
小时最大浓度超标倍数	N/A	未超标	1.8	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	1.2	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	0%	75%	0%	N/A	N/A

表 6-8 肇嘉浜路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.322	0.126	0.448	4.017	2.886	0.115
小时最小值(mg/m ³)	0.117	0.090	0.211	3.071	2.604	0.024
小时平均值(mg/m ³)	0.229	0.106	0.334	3.602	2.721	0.081
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.05	3.0	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	2.2	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	8%	100%	0%	N/A	N/A

表 6-9 江苏路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.655	0.151	0.791	9.862	5.656	0.186
小时最小值(mg/m ³)	0.027	0.087	0.114	2.877	2.731	0.078
小时平均值(mg/m ³)	0.288	0.116	0.404	5.620	3.936	0.115
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.3	5.3	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	2.7	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	38%	71%	0%	N/A	N/A

表 6-10 源深路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.116	0.088	0.194	4.113	2.982	0.140
小时最小值(mg/m ³)	0.005	0.041	0.048	2.574	2.511	0.010
小时平均值(mg/m ³)	0.034	0.056	0.090	3.023	2.705	0.075
小时最大浓度超标倍数	N/A	未超标	1.3	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	未超标	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	0%	25%	0%	N/A	N/A

表 6-11 世纪大道监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.812	0.145	0.954	6.368	4.766	0.141
小时最小值(mg/m ³)	0.120	0.073	0.192	3.194	2.559	0.026
小时平均值(mg/m ³)	0.280	0.100	0.380	4.557	3.446	0.088
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.2	6.4	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	2.5	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	13%	100%	0%	N/A	N/A

表 6-12 浦东大道监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.433	0.132	0.565	5.103	4.347	0.158
小时最小值(mg/m ³)	0.026	0.061	0.088	2.983	2.622	0.031
小时平均值(mg/m ³)	0.252	0.098	0.350	3.988	3.203	0.097
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.1	3.8	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	2.3	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	21%	88%	0%	N/A	N/A

表 6-13 延安东路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.601	0.158	0.759	12.209	3.816	0.183
小时最小值(mg/m ³)	0.096	0.095	0.191	4.117	2.503	0.028
小时平均值(mg/m ³)	0.346	0.124	0.469	5.982	3.180	0.114
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.3	5.1	1.2	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	1.0	3.1	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	54%	100%	8%	N/A	N/A

表 6-14 新华路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.345	0.205	0.544	6.858	3.729	0.410
小时最小值(mg/m ³)	0.014	0.058	0.075	3.149	2.853	0.098
小时平均值(mg/m ³)	0.216	0.114	0.330	5.014	3.175	0.218
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.7	3.6	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	2.2	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	29%	83%	0%	N/A	N/A

表 6-15 北京西路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.183	0.122	0.284	5.350	3.497	0.282
小时最小值(mg/m ³)	0.010	0.050	0.068	3.150	2.131	0.081
小时平均值(mg/m ³)	0.067	0.090	0.157	4.053	2.944	0.200
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.0	1.9	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	1.0	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	4%	46%	0%	N/A	N/A

表 6-16 广中路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.349	0.250	0.599	8.467	5.249	0.311
小时最小值(mg/m ³)	0.010	0.098	0.109	3.629	3.180	0.119
小时平均值(mg/m ³)	0.150	0.159	0.309	5.383	3.771	0.231
小时最大浓度超标倍数	N/A	2.1	4.0	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	1.3	2.1	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	75%	79%	0%	N/A	N/A

表 6-17 吴淞路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.306	0.163	0.458	8.138	4.325	0.285
小时最小值(mg/m ³)	0.046	0.053	0.099	3.031	2.541	0.103
小时平均值(mg/m ³)	0.169	0.117	0.286	4.507	3.218	0.159
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.4	3.1	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	1.9	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	58%	83%	0%	N/A	N/A

表 6-18 四平路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.254	0.184	0.389	7.545	4.880	0.628
小时最小值(mg/m ³)	0.025	0.051	0.076	3.286	3.582	0.164
小时平均值(mg/m ³)	0.123	0.096	0.219	4.820	4.108	0.274
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.5	2.6	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	1.5	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	21%	67%	0%	N/A	N/A

表 6-19 虹梅路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.751	0.159	0.851	9.009	4.919	1.199
小时最小值(mg/m ³)	0.060	0.072	0.132	3.298	2.439	0.071
小时平均值(mg/m ³)	0.293	0.112	0.405	4.848	3.167	0.326
小时最大浓度超标倍数	N/A	1.3	5.7	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	2.7	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	38%	96%	0%	N/A	N/A

表 6-20 北瞿路监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.330	0.113	0.443	5.304	3.776	0.345
小时最小值(mg/m ³)	0.049	0.066	0.120	2.457	1.952	0.052
小时平均值(mg/m ³)	0.122	0.089	0.210	3.350	2.795	0.150
小时最大浓度超标倍数	N/A	未超标	3.0	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	1.4	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	0%	79%	0%	N/A	N/A

表 6-21 嘉松监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.222	0.117	0.319	5.332	4.273	0.484
小时最小值(mg/m ³)	0.014	0.062	0.076	3.699	2.372	0.057
小时平均值(mg/m ³)	0.098	0.084	0.182	4.407	2.827	0.203
小时最大浓度超标倍数	N/A	未超标	2.1	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	1.2	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	0%	54%	0%	N/A	N/A

表 6-22 外青松监测点污染状况

污染物名称	NO	NO ₂	NOx	CO	THC	PM ₁₀
小时最大浓度(mg/m ³)	0.044	0.075	0.111	4.869	2.656	0.321
小时最小值(mg/m ³)	0.004	0.022	0.026	3.639	2.190	0.005
小时平均值(mg/m ³)	0.017	0.041	0.059	4.069	2.371	0.144
小时最大浓度超标倍数	N/A	未超标	未超标	未超标	N/A	N/A
小时平均值超标倍数	N/A	未超标	未超标	未超标	N/A	N/A
小时超标率	N/A	0%	0%	0%	N/A	N/A

4. 小结

上海市大气污染已逐渐转变为石油型和煤烟型并重的复合污染，环境空气质量状况不容乐观，全市大气污染物以可吸入颗粒物和氮氧化物为主。2003 年城区PM₁₀浓度为 0.097 mg/m³，NOx浓度为 0.082 mg/m³。

从 1990 年到 2003 年，受机动车保有量增加的影响，上海市全市 NOx 平均浓度呈上升趋势，2003 年 NOx 浓度是 1990 年的 1.75 倍。近年来随着机动车污染控制措施的实施，中心城区 NOx 浓度的上升趋势得到控制，但郊县 NOx 浓度仍在增加。大气中颗粒物污染突出，细粒子污染严重。

全市NOx浓度季节变化明显，冬季浓度最高，夏季浓度最低。PM₁₀浓度春季受北方沙尘天气影响，保持较高水平，而秋季浓度最低。

全市 NOx 污染的区域分布呈现城区大于郊区、郊区大于郊县的状况。

城区主要交通干线污染状况严重，NOx小时浓度普遍超标，18 个监测点中有 13 个站点超标率大于 70%，延安东路监测点小时平均浓度最高，达到 0.469 mg/m³。多数站点PM₁₀小时浓度变化不大，范围在 0.075 mg/m³到 0.326 mg/m³之间。CO小时平均浓度仅延安东路监测点超标率 8%，其他各点均未超标。

第七章 二氧化氮(NO_2)与其不良健康影响暴露 - 效应关系的建立

1. 前言

由于矿物燃料的燃烧，含氮化合物氧化形成的氮氧化物至少包括以下七种：一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、氧化二氮(N_2O)、三氧化氮(NO_3)、三氧化二氮(N_2O_3)、四氧化二氮(N_2O_4)及五氧化二氮(N_2O_5)。这些化合物之间可以相互转化，因而它们都可归于总氮氧化物(NO_x)。其中，二氧化氮在大气中含量最为丰富，对人类健康的威胁也最大。

二氧化氮被认为是一种重要的大气污染物，因为它不仅具有潜在的健康危害，而且是形成光化学烟雾的一种重要的前体物质。它还与酸雨和二次颗粒物的形成有关。

NO_2 是燃料燃烧产生的氮氧化物中含量最多、毒性最大的一种，它在空气中的浓度与交通运输密度和点源污染有关。室内 NO_2 浓度可能较室外更高。由于 NO_2 的水溶解度很低，所以 NO_2 吸入后进入呼吸道深部。大于 60% 的 NO_2 吸入后沉积于肺，且运动后沉积比例会随之增加。流行病学研究已经发现了室内外 NO_2 浓度水平与呼吸系统疾病、肺功能降低及哮喘(尤其是儿童)之间有关。

室外 NO_2 与居民死亡率的增加也有一定联系。然而，这些流行病学研究多受到暴露错分的影响，且通常未能将室内外颗粒物暴露作为混杂因素加以考虑。在这些流行病学研究中， NO_2 多作为交通或燃料燃烧污染相关的标志性污染物。临床研究未能证明暴露于当前的 NO_2 标准浓度水平或低于该水平时有任何健康效应，这表明环境水平的 NO_2 是一种污染标志物，而不是直接引起效应的污染物。

基于此，本文将利用可得到的资料，尤其是流行病学的研究结果，来阐述 NO_2 与其不良健康影响的暴露 - 效应关系。

2. 临床实验研究

2.1 肺功能及症状

通常， NO_2 急性暴露浓度需大于 $1880\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1ppm)，才能引起健康成年人肺功能的改变^[1-3]。但空气中的 NO_2 浓度通常都不会达到该水平，故有关 NO_2 健康效应的研究都采用呼吸系统疾病的现患病人。大量针对哮喘、慢性阻塞性肺疾病(COPD)及慢性支气管炎患者作为对象的研究表明：暴露于低浓度的二氧化氮能轻微的降低用力肺活量(FVC)、1秒用力呼气容积(FEV1)或增加气道阻力。已有研究绘制了哮喘患者暴露于 $560\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.3ppm)并做轻微运动时的肺功能曲线变化。

最低引起哮喘患者肺功能改变的二氧化氮暴露水平是：暴露于 $560\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.3ppm)间歇运动 30 分钟^[4-5]，低于该暴露水平的对照研究表明有相同的效应趋

势，但没有统计学意义^[6-7]。

2.2 气道反应性

大量的研究评价了 NO_2 对呼吸道受药物、物理(如冷空气)及生物因素(如致敏原)等支气管收缩剂后反应的影响。一般的说，暴露浓度需大于 $1880\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.0ppm)才能引起健康成年人气道反应性的增加^[1-2]。我们更关心的是已患有肺部疾病的人(如哮喘患者的气道反应性已显著升高)的反应性。

2.3 肺灌洗和呼吸道防御反应

最近，研究者们又发现了除肺功能外可用于评价 NO_2 健康效应的测量指标^[1]。分析健康成年人的肺灌洗液发现高水平($5640-7520\mu\text{g}/\text{m}^3$ 即 $3-4\text{ppm}$)的 NO_2 暴露会降低 α -1-蛋白酶抑制剂的活性， α -1-蛋白酶抑制剂是一种保护肺结缔组织不被蛋白水解酶、弹性蛋白酶破坏的蛋白质。但在 $2820\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.5ppm)水平没有出现这种效应^[1]。

总的说来，上述临床实验研究表明， NO_2 对肺功能、气道反应性等有潜在的影响。然而，对于作出定量的暴露-效应关系，这些研究所用的暴露方法及终点判定显得过于粗略和有限。

3. 流行病学研究

很多流行病学调查研究了 NO_2 暴露与死亡率、发病率之间的联系^[1-2]。通常，室外 NO_2 暴露与健康影响关系的流行病学研究不如室内的研究易于定量，但二者的结果从性质上来说是一致的。有关室外 NO_2 暴露相关健康危害研究的一个难点在于，如何从城市环境空气中存在的众多混合污染物(如臭氧、二氧化硫、颗粒物等)引起的健康危害中分离出与特异性地与 NO_2 有关的健康损害。在这种情况下， NO_2 最好是被认为一种环境空气污染的标志物，尤其是在以交通污染为主的城市空气污染。因此，我们在评价室外 NO_2 与其健康效应的流行病学研究时应慎之又慎。

有关室内 NO_2 暴露的研究将暴露于煤气燃烧释放出的 NO_2 的人群与室内没有污染源的二氧化氮低水平暴露人群作比较。研究显示，成年人使用煤气烹饪与呼吸系统症状或肺功能并无关联。有流行病学调查结果显示，使用煤气炉烹饪的中年妇女表现出哮喘症状增加和呼吸短促，但在 1 秒用力呼气容积(FEV1)、用力肺活量(FVC)检测上并没有显著改变。因此，下面的讨论主要集中在儿童。此外，关于 NO_2 作为交通污染为主的城市空气污染的标志物，在欧洲和日本进行的几个流行病学调查提供了呼吸系统疾病与居住在交通繁忙的路边有关的证据，这可能部分与交通相关的 NO_2 高水平暴露有关^[9-10]。

3.1 NO_2 对居民每日死亡率的影响

APHEA 是一个多城市相互配合的项目，利用从欧洲 15 个国家得到的资料，

包括地理学、社会人口统计学、气候学及大气质量模式等，研究大气污染对居民每日死亡率的短期效应。在 APHEA 项目中，从欧洲中部到西部的 6 个城市提供了每日死亡数和 NO_2 浓度的数据^[11]。每个研究城市的数据采用统一的标准方法进行分析，从而保证了结果的可比性。针对单个城市资料，采用了基于广义相加模型 (GAM) 基础上的 Poisson 回归模型；在单个城市分析的基础上，采用固定效应模型和随机效应模型以合并各城市的研究结果。结果发现，居民每日死亡率与 NO_2 浓度有显著的正相关； NO_2 (1 小时最大)浓度每上升 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，居民日死亡数增加 1.3% (95% 可信限 0.9-1.8)。将各城市的结果以黑烟或臭氧作为分层因素对 NO_2 的效应作分层分析，未发现有显著的交互作用。但在黑烟浓度越高的城市， NO_2 产生的健康效应也越大。当使用包括黑烟的两污染物模型合并分析时， NO_2 的健康效应几乎减半(但仍有统计学显著性)。

此外，在过去十年中，有一些研究也报道了室外监测 NO_2 浓度(24h 平均)和总死亡率及分疾病别死亡率之间有显著的正关联^[12-16]。然而在这些研究中，都不能将 NO_2 对健康的影响从同时存在的颗粒物对健康的影响中分离出来。众所周知，在城市地区，颗粒物与死亡率的增加有着更强、更一致的关联，因而更可能是引起这种健康危害的污染物。例如 阎海东和陈秉衡^[12]研究了我国上海 2000 年 6 月至 2001 年 12 月间大气污染(PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2)与居民每日死亡率之间的关系。该研究考虑了居民死亡数的波动受长期变化趋势、季节变化以及气候的影响，在分析采用了广义相加模型；结果显示， NO_2 浓度每上升 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，居民(排除意外伤害后)总死亡发生的相对危险度为 1.015(95% CI: 1.008-1.022)。但同时作者也指出，考虑到各大气污染物之间有较高的相关性，很难区分出某一特定污染物的单一效应。

最近有一个 meta 分析全面综合地评价了全世界大气污染(包括 NO_2)和居民死亡率关系的时间序列研究^[17]。纳入分析的大多数研究都来源于北美和欧洲。结果发现，随机效应模型显示 NO_2 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，导致居民超死亡率为 2.38%(95% CI 1.79-2.98%)。多污染物模型下， NO_2 的健康效应没有显著性；但若使用呼吸系统疾病死亡率作评价，则 NO_2 效应强度会增加。

总之， NO_2 对居民每日死亡率的短期效应受到其它污染物的混杂影响，因此，对 NO_2 急性死亡影响的单独评价，尚需更多研究的证实。

3.2 二氧化氮对发病率的影响

3.2.1 二氧化氮对学龄儿童呼吸系统疾病影响的 meta 分析

许多流行病学调查表明，儿童暴露于 NO_2 会引起呼吸系统疾病发病率增高，尽管这其中的大多数研究结果并没有统计学意义上的显著性。所以，我们采用 meta 分析的方法，检验这些研究结果的一致性，并对它们进行合并分析。

3.2.1.1 健康效应终点

本次 meta 分析考虑的终点是反映 12 岁以下儿童呼吸系统健康状态的指标。所有的研究都需运用标准调查问卷。众所周知，儿童时期下呼吸道发病有一系列相同的症状和疾病，这说明了其下呼吸道解剖学上发生了改变。

3.2.1.2 研究的选择

对进入本次 meta 分析的研究，我们要求：

- (1) 健康效应终点必须与标准效应终点一致或相当接近。
- (2) 研究对象必须有显著的暴露差异，且可以得到暴露的资料。
- (3) 必须提供某特定暴露梯度的 OR 值，或根据提供的数据可以计算 OR 值。

根据上述标准，在仔细查阅了发表的文献后，符合上述标准的 9 篇文献被选入做定量分析。我们采用的 NO_2 暴露浓度差值为 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3(0.015\text{ppm})$ ，这一浓度与文献报道的使用煤气炉与电炉家庭的暴露浓度差值相符。

3.2.1.3 入选文献的简要描述

Melia 等(1977)^[26]调查了英格兰和苏格兰的 5758 名至少有咳嗽、感冒症状、支气管炎症状中一种的 6 - 11 岁的儿童。报道的症状中，大多为作为下呼吸道发病指示的感冒症状。该文献中没有测量 NO_2 暴露情况，因此假设英格兰地区使用煤气炉造成的 NO_2 暴露与英国其他地区是一致的，为 $31.1\mu\text{g}/\text{m}^3(0.0165\text{ppm})$ 。OR 估计值为 1.31，95% 可信限为 1.16 - 1.48。调整为标准暴露增加浓度 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3(0.015\text{ppm})$ 后，OR 估计值为 1.28，95% 可信限为 1.14 - 1.43。

Melia 等(1979)^[27]报道的对 5 - 10 岁儿童的横断面调查同样提供了 OR 值的估计，但没有 NO_2 的暴露情况。在此，我们采用了 Melia 等在 1977 年的文献中使用的暴露浓度差值。结果发现，其 OR 估计值为 1.24，95% 可信限为 1.09 - 1.42。调整为标准暴露增加浓度 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3(0.015\text{ppm})$ 后，OR 估计值为 1.22，95% 可信限为 1.08 - 1.37。

Melia 等(1980)^[19]对 6-7 岁的儿童进行调查，并测量卧室中的 NO_2 浓度作为暴露估计。该研究的健康效应终点与前几个相同。结果发现，暴露浓度每增加 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3(0.015\text{ppm})$ ，OR 估计值为 1.49，95% 可信限为 1.04 - 2.14。

Melia 等(1982a,b)^[20-21]调查了 5-6 岁的儿童，同样测量了卧室中的 NO_2 浓度作为暴露估计，使用相同的健康效应终点。暴露浓度增加 0.015ppm，OR 估计值为 1.11，95% 可信限为 0.84 - 1.46。卧室内一周内 NO_2 浓度十分位数与九十分位数分别为 0.009ppm 和 0.065ppm^[21]。

Ware 等(1984)^[25]在第一次哈佛六城市队列研究中报道了呼吸系统疾病发生的指数。采用是否使用煤气炉作为 NO_2 的暴露指标($32.5\mu\text{g}/\text{m}^3, 0.0173\text{ppm}$)。OR 估计值为 1.08，95% 可信限为 0.97 - 1.19。调整为标准暴露增加浓度 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$

(0.015ppm)后，OR 估计值为 1.07，95% 可信限为 0.98 - 1.17。第二次哈佛六城市队列研究报道了卧室中一周内 NO_2 浓度十分位数与九十分位数分别为 0.008 ppm 和 0.033ppm^[18]。 NO_2 暴露浓度增加 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.015ppm)，出现任何呼吸系统症状的 OR 估计值为 1.40，95% 可信限为 1.14 - 1.72。

Ekwo 等(1983)^[24]研究了 1355 名 6 - 12 岁儿童的几种呼吸系统疾病。该研究没有暴露水平的测量，同样以是否使用煤气炉作为 NO_2 暴露指标($32.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0173ppm)。没有与所需要的研究终点相接近的终点。最为相似的两个终点为 2 岁前因胸部疾病住院和感冒伴肺充血及咳痰。住院的 OR 估计值为 2.40，感冒伴咳嗽咳痰的 OR 估计值为 1.09，95% 可信限为 0.82 - 1.45。最后一个症状与所需研究的终点最为相似，故将其纳入本次 meta 研究中。

Dijkstra 等(1990)^[22]对荷兰 6 - 12 岁不吸烟儿童进行了 2 年的有关室内二氧化氮暴露与呼吸系统疾病的研究。研究数据显示， NO_2 暴露浓度每增加 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.015ppm)，OR 估计值为 0.94，95% 可信限为 0.70 - 1.27。该研究测量了 NO_2 暴露的数据，但本次 meta 分析没有调整协变量，因为在 NO_2 暴露的原始表格中没有包括协变量。

Keller 等(1979)^[23]在研究中没有发现呼吸系统疾病与使用煤气炉有统计学上显著联系，但下呼吸道疾病未调整 OR 估计值为 1.10，95% 可信限为 0.74 - 1.54。假设暴露浓度为 $32.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.0173ppm)，则暴露浓度为 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.015ppm)的调整 OR 值为 1.09，95% 可信限为 0.82 - 1.46。

上述各个独立研究的结果总结于表 7-1。

表 7-1 NO_2 浓度增加 0.015ppm 时，学龄期儿童呼吸系统疾病发生的 OR 值

作者	OR 估计值	95% CI
Melia et al. (1977) ^[26]	1.28	1.14 to 1.43
Melia et al. (1979) ^[27]	1.22	1.08 to 1.37
Melia et al. (1980) ^[19]	1.49	1.04 to 2.14
Melia et al. (1982a,b) [20-21]	1.11	0.84 to 1.46
Ware et al. (1984) ^[25]	1.07	0.98 to 1.17
Neas et al. (1991) ^[18]	1.40	1.14 to 1.72
Ekwo et al. (1983) ^[24]	1.09	0.82 to 1.45
Dijkstra et al. (1990) ^[22]	0.94	0.70 to 1.27
Keller et al. (1979) ^[23]	1.09	0.82 to 1.46

3.2.1.4 meta 分析结果

我们采用固定效应模型进行meta分析，其OR估计值为1.17，95%可信限为 1.11 - 1.23。固定效应模型是基于参数是同质的分析方法；所以，我们对9个研究的同质性进行卡方检验，卡方值为12.32，自由度为8，p值为0.1375。因此，

可以从一定程度上说，每个研究的参数是不完全一致的。所以，在此，我们认为采用随机效应模型进行分析更为合理。

随机效应模型的分析结果与固定效应模型的结果一致，仅可信限较其微宽。理论上讲，因为随机效应模型没有假设所有研究的参数都是相同的，因而相对合理。

总之，两种分析方法的结论是一致的，即 OR 估计值约为 1.2，95% 可信限约为 1.1 - 1.3。

3.2.2 NO₂ 对 2 岁以下儿童呼吸系统疾病影响的 meta 分析

查阅文献我们发现，有很多研究针对 NO₂ 对 2 岁以下儿童进行了相关研究。与针对学龄期儿童的研究相比，其主要区别在于健康终点的测量更为不一致。为了有一定的可比性，我们也做了 NO₂ 对 2 岁以下儿童呼吸系统疾病影响的 meta 分析。

表 2 为我们收集的相关流行病学资料。表中七个研究均是针对家中有煤气炉的 2 岁以下儿童，其对照组为家中没有煤气炉的儿童^[24,25,28-32]。这些研究中，范围最广的是 Samet 等在美国新墨西哥州阿尔伯克基进行的包括了 1000 多个小于 18 个月的婴儿。儿童卧室中一周内 NO₂ 浓度十分位数与九十分位数分别为 9.4 和 94 μg/m³(0.005 ppm 和 0.05 ppm)。这些卧室的暴露与短期婴儿个体暴露的初步研究有很好的相关性。很少有儿童在烹饪的时间在厨房中，因此峰值暴露很少出现。试验设计和暴露评估是十分严格的，但没有发现显著的效应。其他的研究是在英格兰、苏格兰及美国其他城市中进行的。

这七个研究的 Meta 分析结果显示，NO₂ 浓度每增加 28.3 μg/m³ 呼吸系统疾病增加的合并 OR 值为 1.09，95% 可信限为 0.95 - 1.26，说明 NO₂ 与 2 岁以下儿童呼吸系统疾病的增加没有统计学意义上的联系。

表 7-2 NO_2 对 2 岁以下儿童呼吸系统疾病影响的的 OR 值、健康效应及暴露估计

参考文献	OR	95% CI	健康效应	NO_2 暴露 估计 (ppm)	年龄	研究地点及时间
Melia et al. (1983) ^[28]	0.63	0.36-1.10	呼吸系统疾 病发病率	0.0165	< 1岁	英格兰 (1978)
Ekwo et al. (1983) ^[24]	2.40	1.06-3.74	因胸部疾病 住院	0.0173	< 2岁	美国爱荷华州
Ware et al. (1984) ^[25]	1.11	0.97-1.27	2岁前有呼吸 系统疾病	0.0173	< 2岁	美国六城市 (1974-1979)
Ogston et al. (1985) ^[29]	1.14	0.86-1.50	呼吸系统疾 病发病率	0.0165	< 1岁	苏格兰 (1980)
Dockery et al. (1989a) ^[30]	1.15	0.96-1.37	2岁前有呼吸 系统疾病	0.0150	< 2岁	美国六城市 (1983-1986)
Margolis et al. (1992) ^[31]	1.12	0.63-2.04	持续的下呼 吸道症状	0.0105	< 1岁	美国北卡罗来 纳州 (1986-1988)
Samet et al. (1993) ^[32]	0.99	0.94-1.04	下呼吸道疾 病发病率	0.015	< 18岁	美国阿尔伯克 基 (1988-1990)

4. 总结

本文系统综述了 NO_2 对儿童和成人各项健康终点的影响。从以上分析可看出, NO_2 对婴幼儿及学龄儿童死亡率、发病率改变, 尤其是下呼吸道症状和疾病的产生是有影响。大多室内研究表明, 儿童下呼吸道疾病发病率与长期 NO_2 暴露有关。调查中发现卧室中一周内 NO_2 浓度绝大多数在 $15 - 122\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.008-0.0065\text{ppm}$)。综合分析相似健康终点的室内研究, 结果显示 NO_2 浓度每增加 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.015ppm), 下呼吸道疾病发病率增加的合并 OR 值为 1.2, 95% 可信限为 1.1-1.3。也就是说, NO_2 浓度每增加 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.015ppm), 呼吸道症状和疾病发生增加 20%。因此, 合并分析结果支持 NO_2 暴露对 5 - 12 岁儿童下呼吸道症状和疾病的影响。

对 2 岁或更小的儿童室内调查没有发现 NO_2 暴露与呼吸系统症状和疾病的流行有与上述一致的关联。根据室内婴儿研究所做的 meta 分析结果表明, 在卧室中一周 NO_2 浓度范围主要在 $9.4 - 94\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.005 - 0.05\text{ppm}$) 的暴露水平下, NO_2 浓度每增加 $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.015ppm) , 呼吸系统疾病增加的合并 OR 值为 1.09, 95% 可信限为 0.95 - 1.26。危险度的增加非常小, 且并非所有研究结果都一致。我们不能就此像对稍大儿童那样得出 NO_2 对婴儿的效应。

当然, 对上述 meta 分析的结果解释应考虑几个不确定性。对于暴露水平的

测定误差是 NO₂ 流行病学研究在方法学上的最重要的潜在问题。虽然有证据表明呼吸系统症状与 NO₂ 暴露有联系，但对暴露水平的测定不足以确定暴露与症状之间的定量关系。大多数研究对 NO₂ 暴露的测定都十分短，只有 1 - 2 周，而且报道的都是平均暴露水平。很少有研究注意暴露模式诸如一过性峰值与效应的联系。此外，测量的 NO₂ 浓度不一定是生物学上相应的剂量；估计实际的暴露水平需要知道污染物水平和人类相关的行为模式。然而，可得到的行为和大气测量的数据都十分有限，且外推至环境暴露十分困难。加之虽然在 NO₂ 的研究中终点测量基于相似的水平和共同的原理，为他们用于定量分析提供了依据，但合并的症状和疾病在某种程度上是不一致的，而且他们的确代表了不同的基本病理过程。因此对 meta 分析结果应谨慎解释。我们同时应关注尚未被确定的亚慢性及慢性的 NO₂ 无效应水平暴露。

此外，从现有的研究尚不能明确室外 NO₂ 暴露与呼吸系统健康之间的关系。有一定的证据表明环境中高水平 NO₂ 能引起持续的呼吸系统疾病增加。室外研究分析的主要难点是从相互关联的污染物中区分出 NO₂ 的可能效应。

从上述分析可以得出以下结论：

- 人群临床对照研究表明 NO₂ 对肺功能、呼吸道反应性及宿主防御功能会造成影响。但从现阶段的研究结果并不能对这种效应做出定量的暴露 - 反应关系。
- 从对文献的回顾分析来看，短期和长期的 NO₂ 暴露与儿童呼吸系统疾病归因死亡率有显著关联。这种关联在 5 - 12 岁儿童的研究中更为一致。
- 对于成年人的研究中，虽然有研究表明室外 NO₂ 浓度与呼吸系统疾病死亡率和发病率有显著关联，但短期和长期的 NO₂ 暴露与呼吸系统疾病并不像儿童那样明显一致。
- 在许多室外大气污染研究中，NO₂ 与其它共存的大气污染物(尤其是颗粒物)有很强的相关性，这使得分出 NO₂ 的单一效应较为困难。

参考文献：

1. Air quality criteria for oxides of nitrogen. Research Triangle Park, NC, US Environmental Protection Agency 1993 (EPA Report No. EPA/600/8-91/049aF-cF. 3v).
2. BERGLUND, M. ET AL. Health risk evaluation of nitrogen oxides. Scandinavian journal of work, environment and health, 19 (Suppl. 2) (1993).
3. WAGNER, H. M. Update of a study for establishing criteria (dose/effect relationships) for nitrogen oxides. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 1985 (Report No. EUR 9412 EN).
4. ROGER, L. J. ET AL. Pulmonary function, airway responsiveness, and respiratory symptoms in asthmatics following exercise in NO₂. Toxicology and industrial health, 6: 155–171 (1990).
5. BAUER, M.A. Inhalation of 0.30 ppm nitrogen dioxide potentiates exercise-induced bronchospasm in asthmatics. American review of respiratory disease, 134: 1203–1208 (1986).
6. BYLIN, G. ET AL. Effects of short-term exposure to ambient nitrogen dioxide concentrations on human bronchial reactivity and lung function. European journal of respiratory disease, 66: 205–217 (1985).
7. HAZUCHA, M.J. ET AL. Effects of 0.1 ppm nitrogen dioxide on airways of normal and asthmatic subjects. Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology, 54: 730–739 (1983).
8. JEDRYCHOWSKI, W. ET AL. Effects of domestic gas cooking and passive smoking on chronic respiratory symptoms and asthma in elderly women. International journal of occupational and environmental health, 1: 16–20 (1995).
9. WJST, M. ET AL. Road traffic and adverse effects on respiratory health in children. British medical journal, 307: 596–600 (1993).
10. EDWARDS, J. ET AL. Hospital admissions for asthma in preschool children: relationship to major roads in Birmingham, United Kingdom. Archives of environmental health, 49: 223– 227 (1994).
11. Touloumi G, Katsouyanni K, Zmirou D et al. Short-term effects of ambient oxidant exposure on mortality: a combined analysis within the APHEA project. Air Pollution and Health: a European Approach. Am J Epidemiol. 1997 Jul 15;146(2):177-85.
12. Kan H, Chen B (2003). Air pollution and daily mortality in Shanghai: a time series study. Archives of Environmental Health, 58(6): 360-367.
13. Tsai SS, Huang CH, Goggins WB, Wu TN, Yang CY. Relationship between air pollution and daily mortality in a tropical city: Kaohsiung, Taiwan. J Toxicol Environ Health A. 2003 Jul 25;66(14):1341-9.

14. KINNEY, P.L. & ÖZKAYNAK, H. Associations of daily mortality and air pollution in Los Angeles County. *Environmental research*, 54: 99–120 (1991).
15. SALDIVA, P.H.N. ET AL. Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminary report. *Environmental research*, 65: 218–225 (1994).
16. ZMIROU, D. ET AL. Short term effects of air pollution on mortality in the city of Lyon, France, 1985-90. *Journal of epidemiology and community health*, 50 (Suppl. 1): S30–S35 (1996).
17. Stieb DM, Judek S, Burnett RT. Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season. *J Air Waste Manag Assoc*, 2002; 52(4):470-84.
18. Neas LM, Dockery DW, Ware JH, Spengler JD, Speizer FE, & Ferris BG Jr (1991) Association of indoor nitrogen dioxide with respiratory symptoms and pulmonary function in children. *Am J Epidemiol*, 134: 204-219.
19. Melia RJW, Florey C du V, Chinn S, Goldstein BD, Brooks AGF, John HH, Clark D, Craighead IB, & Webster X (1980) The relation between indoor air pollution from nitrogen dioxide and respiratory illness in primary schoolchildren. *Clin Respir Physiol*, 16: 7P-8P.
20. Melia RJW, Florey C du V, Morris RW, Goldstein BD, Clark D, & John HH (1982a) Childhood respiratory illness and the home environment. I. Relations between nitrogen dioxide, temperature and relative humidity. *Int J Epidemiol*, 11: 155-163.
21. Melia RJW, Florey C du V, Morris RW, Goldstein BD, John HH, Clark D, Craighead IB, & Mackinlay JC (1982b) Childhood respiratory illness and the home environment: II. Association between respiratory illness and nitrogen dioxide, temperature and relative humidity. *Int J Epidemiol*, 11: 164-169.
22. Dijkstra L, Houthuijs D, Brunekreef B, Akkerman I, & Boleij JSM (1990) Respiratory health effects of the indoor environment in a population of Dutch children. *Am Rev Respir Dis*, 142: 1172-1178
23. Keller MD, Lanese RR, Mitchell RI, & Cote RW (1979) Respiratory illness in households using gas and electricity for cooking: II. Symptoms and objective findings. *Environ Res*, 19: 504-515.
24. Ekwo EE, Weinberger MM, Lachenbruch PA, & Huntley WH (1983) Relationship of parental smoking and gas cooking to respiratory disease in children. *Chest*, 84: 662-668.
25. Ware JH, Dockery DW, Spiro A III, Speizer FE, & Ferris BG Jr (1984) Passive smoking, gas cooking, and respiratory health of children living in six cities. *Am Rev Respir Dis*, 129: 366-374.
26. Melia RJW, Florey C du V, Altman DG, & Swan AV (1977) Association between

- gas cooking and respiratory disease in children. Br Med J, 2: 149-152.
27. Melia RJW, Florey C du V, & Chinn S (1979) The relation between respiratory illness in primary schoolchildren and the use of gas for cooking: I. Results from a national survey. Int J Epidemiol, 8: 333-338.
28. Melia RJW, Florey C, Sittampalam Y, & Watkins C (1983). The relation between respiratory illness in infants and gas cooking in the UK: a preliminary report. In: Proceedings of the VIth World Congress on Air Quality Paris, Air Pollution Prevention Association, pp 263-269.
29. Ogston SA, Florey C du V, & Walker CHM (1985) The Tayside infant morbidity and mortality study: effect on health of using gas for cooking. Br Med J, 290: 957-960.
30. Dockery DW, Spengler JD, Neas LM, Speizer FE, Ferris BG Jr, Ware JH, & Brunekreef B (1989a) An epidemiologic study of respiratory health status and indicators of indoor air pollution from combustion sources. In: Harper JP ed. Combustion processes and the quality of the indoor environment: transactions of an international specialty conference. Pittsburgh, Pennsylvania, Air and Waste Management Association, pp 262-271 (A&WMA Transactions Series: TR-15).
31. Margolis PA, Greenberg RA, Keyes LL, Lavange LM, Chapman RS, Denny FW, Bauman KE, & Boat BW (1992) Lower respiratory illness in infants and low socioeconomic status. Am J Public Health, 82: 1119-1126.
32. Samet JM, Lambert WE, Skipper BJ, Cushing AH, Hunt WC, Young SA, McLaren LC, Schwab M, & Spengler JD (1993) Health outcomes. In: Nitrogen dioxide and respiratory illness in children, part I. Cambridge, Massachusetts, Institute of Health Effects, pp 1-32 (Research Report No. 58).

第八章 大气颗粒物暴露与人群健康效应暴露 - 反应关系的 meta 分析

1. 前言

国内外过去 10-20 年的流行病学研究均正式大气污染暴露与居民发病率和死亡率的变化相关^[1]。而在目前公认的各种大气污染物中，尽管其它污染物与不良健康效应也有联系，颗粒物（包括总悬浮颗粒物 TSP，可吸入颗粒物 PM₁₀，细颗粒物 PM_{2.5}等）与人群健康各终点的流行病学联系最为密切。颗粒物与居民死亡的联系尤其强烈，且已在全世界不同浓度范围、不同地区、不同气候条件和其它混杂污染物的情况下得到广泛证实。

随着大气污染健康危害证据的积累，如何定量评价大气污染的健康危害并进行控制大气污染的成本 - 效益分析成为相关政策讨论的关键话题之一。事实上，最近有好几项研究定量估计了大气颗粒物污染的健康危害及其经济损失^[2]。这些研究都高度强调了颗粒物污染对居民公共卫生的影响。

暴露 - 反应关系把大气质量的变化和人群健康效应终点的改变相关联，是定量评价大气污染健康危害的关键之一。和绝大多数西方国家相比，我国大气污染的构成差异很大。因此，发达国家得出的暴露 - 反应关系不能直接地应用于我国。此外，当地人口的状况，如年龄分布和健康状况，也是影响大气污染对公共健康危害的因素。此前，我们曾经收集了相关的中文资料，采用 meta 分析的方法得出了大气颗粒物污染与我国居民不良健康效应的关系^[3]。在本次研究中，我们利用所有可得到的国内外流行病学资料，试图得出大气颗粒物暴露与居民各项健康效应终点暴露反应关系的系数及其 95% 的可信限。当对某一健康终点存在数项流行病学研究结果时，我们也采用了如前所述的 meta 分析方法。我们得出的暴露反应关系可应用于我国大气污染相关的健康危险度评价工作。

2. 材料与方法

2.1 资料来源

通过计算机联机检索《中国生物医学文献数据库》、《美国医学索引 (MEDLINE)》及相关文献追溯等途径，收集国内外 1990-2003 年间公开发表的关于大气颗粒物污染与居民不良健康效应关系的流行病学文献，提取其暴露 - 反应关系系数及其 95% 可信限。

考虑到上海和我国资料的可得性，我们选择可吸入颗粒物 PM₁₀ 作为颗粒物的指标。但是，尽管 PM₁₀ 被选为本次评价的大气指示性污染物，但仍有部分研究采用 TSP、PM_{2.5} 作为暴露评价的指标。因此，如果需要，我们对不同大气颗粒物污染浓度指标进行如下的转换：

$$\text{PM}_{10} = \text{TSP} \times 0.65 \quad \text{PM}_{2.5} = \text{PM}_{10} \times 0.65^{[4]}$$

2.2 文献资料选择

大气颗粒物相关的健康效应包括从发病到死亡的一系列终点变化。这些流行病学研究在许多方面均有所不同，比如，对健康效应终点的定义，选择的污染物的测量方式，结果的报告解释等。当有多个研究的目标人群为同一地区的居民时，这些研究的独特之处需要着重考虑；比如，它们可能在不同的时间发表，采用的统计方法也有所不同。因此，我们根据下列标准选择本次研究所评价的健康终点：

- (1) 本次 meta 分析包括的研究数量不应该成为选择研究的决定因素之一；也就是说，本研究中纳入的研究数目应该不受到任何数目上的限制；
- (2) 我们决定优先采用我国自己的研究结果。对某些中文文献未见报导、而又公认与大气污染相关的健康效应，如大气污染长期暴露对人群死亡率的影响，我们选用了公认的国外研究资料。
- (3) 每个城市应该只有一个结果用于本次 meta 分析。许多城市曾经被不止一次的进行过研究，因此我们需要一个选择合理估计结果的原则。我们决定采用各个城市最新发表的结果；同时，如果该城市参与了多城市的研究，采用该多城市研究的结果。
- (4) 各健康终点与大气污染的关系是以定量的暴露 - 反应关系（如斜率、相对危险度等）表达，而不是仅仅进行定性描述。
- (5) 部分亚临床症状，如肺功能的改变，由于难以评价这种变化对人体健康的长期影响，且难以进行相应经济分析，故并未包括在本次研究之内。

根据以上标准，本研究采用的与 PM₁₀ 暴露相关的健康终点包括：

- 死亡率（长期死亡率变化）
- 发病率
 - 慢性支气管炎
 - 住院人数（呼吸系统与心血管系统）
 - 门诊人数（内科、儿科）
 - 其它疾病：急性支气管炎、哮喘发作

3. Meta 分析

对某一特定健康效应终点，如果有数篇文献加以阐述，我们对各研究暴露 - 反应关系进行 meta 综合分析得到其均数和 95% 可信限。meta 分析方法是 1976 年由 Glass 首先正式提出的，它是对具有相同研究目的的多个独立研究结果进行系统的、定量的统计学综合分析的一种研究方法，是对文献资料的再分析。

Meta 分析过程大体分三步：文献收集评价、数据定量合并和结果评价解释。我们将相应文献暴露 - 反应关系输入计算机，建立数据库，并进行数据核校及齐性检验，最后进行统计合并。首先估计各个研究结果是否具有一致性，即进行一致性 Q 检验。若接受齐性假设，则按固定效应模型，以研究内方差的倒数作为权重进行统计量合并。若拒绝齐性假设，则认为各项研究结果不一致，需使用随机效应模型（DerSimonian-Laird 法）进行结果合并。随机效应模型将各独立研究看成研究总体的一个样本，允许各研究间存在差异，且变异是随机的结果，考虑研究间的变异，以研究内和研究间方差的倒数作为权重进行结果合并。本次 meta 分析的最终结果以大气 PM₁₀ 浓度每升高一定单位（10μg/m³），人群不良健康效应发生的相对危险度表示。

我们在 Stata® 7.0 软件上采用附加 meta 分析模块进行上述 meta 分析过程。

4. 结果

4.1 总死亡率（慢性，≥30 岁成人）

目前分析大气污染对死亡长期慢性影响的流行病学研究方法包括队列研究和地区间比较的生态学研究。考虑到生态学研究“先天”设计上的缺陷，其对混杂因素（“生态学谬误”）控制较难，因此我们在此只选择队列研究分析大气污染长期慢性暴露对死亡的影响。我国目前只有部分地区间比较的生态学研究分析了大气污染长期慢性暴露对居民死亡的影响，因此此处我们只有采用国际上相关的研究结果。

两个美国进行的队列研究（哈佛六城市研究和美国癌症协会研究）给出了大气颗粒物长期暴露与人群死亡率关系的关系^{[5][6]}。这些队列研究给出了每年因大气污染相关的死亡数，因此可直接用于健康危险度评价工作。最近，Pope 等人对美国癌症协会队列研究进行了跟踪观察，采集了更多的颗粒物数据，并给出了最新的研究结果^[7]。因此，本次课题采用美国的两项队列研究结果^{[5][7]}用于评价大气颗粒物长期暴露对居民死亡率的影响。

在样本量较大的美国癌症协会（ACS）研究中，Pope^[7]等分析了美国各大城市 50 万成人（≥30 岁）暴露于不同水平大气污染后的生存状况，结果发现大气 PM₁₀ 每增加 10μg/m³，人群总死亡发生的危险增加 4.0%（Pope et al, 2002）；另一项相对较小的哈佛六城市研究中，Dockery^[5]等调查了 8111 个成人死亡与大气污染的关系，发现 PM₁₀ 每增加 10μg/m³，人群总死亡增加 8.5%（Dockery et al, 1993）。

对这两项队列研究结果的 meta 分析表明，大气 PM₁₀ 浓度每增加 10μg/m³，成年人群总死亡的相对危险度为 1.043（95% CI 1.026, 1.061）。

4.2 患病终点

4.2.1 慢性支气管炎

采用不同污染程度地区间比较的生态学方法，我国井立滨等在本溪^[8]、马洪宝等在上海^[9]分析了大气污染暴露与慢性支气管炎新发病例的关系。本溪的研究表明，大气 TSP 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，慢性支气管炎发病率会增加 3%；上海的研究表明，大气 TSP 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，慢性支气管炎发病率会增加 2.9%。

对这两项研究的综合分析表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成年人群总死亡的相对危险度为 1.0460 (1.0150, 1.0770)

4.2.2 住院

我国目前尚无大气颗粒物污染与居民住院人数相关的报导。欧洲和北美的时间序列研究表明，大气颗粒物污染与呼吸系统和心血管系统疾病每日住院人数相关。因此，本研究采用国际上公开发表的文献进行该终点的暴露 - 反应关系分析。

- 呼吸系统住院

Spix C, Wordley J, Prescott G 等在欧洲的研究表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，呼吸系统住院的相对危险度为 1.008 (95% CI 1.004-1.012)^[10-12]；Thurston GD、Schwartz J、Burnett RT 等在北美的研究表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，呼吸系统住院的相对危险度为 1.017 (95% CI 1.013-1.020)^[13-20]。

对所有欧洲、美国和加拿大研究的 meta 分析表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，呼吸系统住院的相对危险度为 1.013 (95% CI 1.010-1.015)。

- 心血管系统住院

Medina、Prescott GJ、Wordley J、Poloniecki J 等在欧洲的研究表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，心血管系统住院的相对危险度为 1.013 (95% CI 1.007-1.019)^{[11][12][21][22]}；Burnett RT、Schwartz J 等在北美的研究表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，心血管系统住院的相对危险度为 1.008 (95% CI 1.004-1.011)^{[20][23][24]}。

对所有欧洲、北美研究的 meta 分析表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，心血管系统住院的相对危险度为 1.009 (95% CI 1.006-1.013)。

4.2.3 门诊人数

目前，我国只有一项研究探讨了大气污染与医院门诊人数的关系。徐希平等在北京的研究表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，内科门诊和儿科门诊人数分别增加 3.4% (95% CI 1.9%-4.9%) 和 3.9% (95% CI 1.4%-6.4%)^[25]。

4.2.4 急性支气管炎

我国井立滨等在本溪的研究表明，大气 PM_{10} 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，居民急性支气管炎发病增加 4.6% (95% CI 0-9.2%)^[8]。

4.2.5 哮喘

- 儿童哮喘 (≤ 15 岁)

我国魏复盛等在兰州、广州、武汉和重庆四城市调查了大气污染与儿童哮喘的关系，发现大气PM₁₀浓度每增加10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，儿童哮喘发病率增加6.95%^[26]。

- 成人哮喘 (> 15 岁)

我国目前尚无大气污染与成人哮喘相关的报导。Dusseldorf A、Hiltermann TJ、Neukirch F et al在欧洲的研究表明，大气PM₁₀浓度每增加10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成人哮喘发作的相对危险度为1.039 (95% CI 1.019-1.059)^{[27][28][29]};Pope CA、Ostro B et al在美国的研究表明，大气PM₁₀浓度每增加10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成人哮喘发作的相对危险度为1.002 (95% CI 0.998-1.006)^{[30][31]}。

综合欧洲和美国的研究结果，发现大气PM₁₀浓度每增加10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，成人哮喘发作的相对危险度为1.004 (95% CI 1.000-1.008)。

详细暴露 - 反应关系均数及其标准误见表1总结。表2总结了meta分析的结果，该结果以大气PM₁₀浓度每增加10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，各健康终点发生的危险度来表示。

表 8-1 颗粒物浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 人群健康效应增加的百分数 (%)

健康效应终点	作者/研究地点	目标人群	颗粒物	暴露-反应关系	
				均数 (β)	标准误 (SE)
总死亡率 (慢性)	Pope et al/美国	≥ 30 岁	PM ₁₀	4.00	2.0
	Dockery et al/美国	≥ 30 岁	PM ₁₀	8.50	2.30
慢性支气管炎	井立滨等/本溪	总人群	TSP	3.00	1.02
	马洪宝等/上海	总人群	TSP	2.90	—*
呼吸系统住院	Spix et al, Wordley et al, Prescott et al / 欧洲	总人群	PM ₁₀	0.80	0.21
	Thurston et al, Schwartz J, Burnett et al / 北美	总人群	PM ₁₀	1.70	0.18
心血管系统住院	Medina et al, Poloniecki et al, Wordley et al, Prescott et al / 欧洲	总人群	PM ₁₀	1.30	0.31
	Schwartz and Morris, Schwartz, Burnett et al / 北美	总人群	PM ₁₀	0.80	0.18
内科门诊人数	徐希平等/北京	总人群	TSP	0.22	0.05
儿科门诊人数	徐希平等/北京	总人群	TSP	0.25	0.08
急性支气管炎	井立滨等/本溪	总人群	TSP	3.00	1.53
哮喘(≤ 15 岁)	魏复盛等/广州、武汉、兰州、重庆	≤ 15 岁	PM ₁₀	6.95	—*
哮喘(≥ 15 岁)	Dusseldorf et al, Hiltermann et al, Neukirch et al / 欧洲	≥ 15 岁	PM ₁₀	3.90	1.02
	Pope et al, Ostro et al / 北美	≥ 15 岁	PM ₁₀	0.20	0.20

* 原文未提供相应资料

表 8-2 PM₁₀ 浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 居民健康效应各终点

发生的相对危险度 (均数及其 95% 可信限)		
健康效应终点	人群	相对危险度 (95% 可信限)
总死亡率	成人 (≥ 30 岁)	1.0430 (1.0260 , 1.0610)
慢性支气管炎	全人群	1.0460 (1.0150 , 1.0770)
呼吸系统住院	全人群	1.0130 (1.0010 , 1.0250)
心血管系统住院	全人群	1.0095 (1.0060 , 1.0130)
内科门诊人数	全人群	1.0034 (1.0019 , 1.0049)
儿科门诊人数	全人群	1.0039 (1.0014 , 1.0064)
急性支气管炎	全人群	1.0460 (1.0000 , 1.0920)
哮喘	儿童 (≤ 15 岁)	1.070*
哮喘	成人 (≥ 15 岁)	1.0040 (1.0000 , 1.0080)

* 原文未提供相应 95% CI

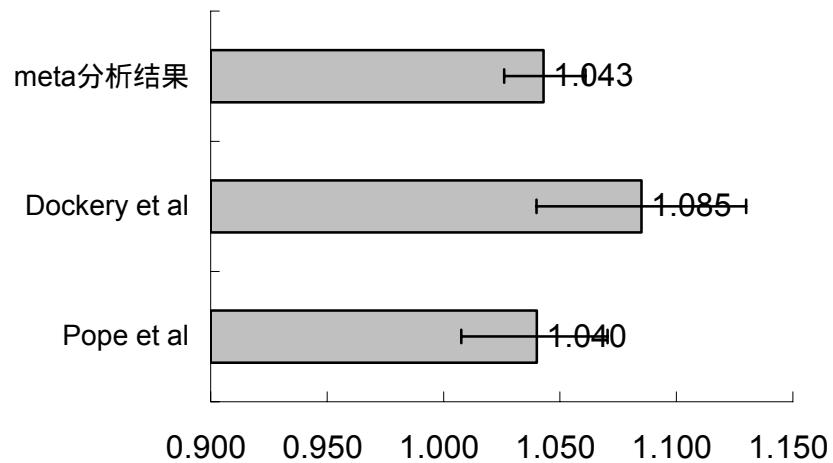


图 8-1 PM₁₀ 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 居民 (≥ 30 岁) 总死亡 (慢性)
发生的相对危险度

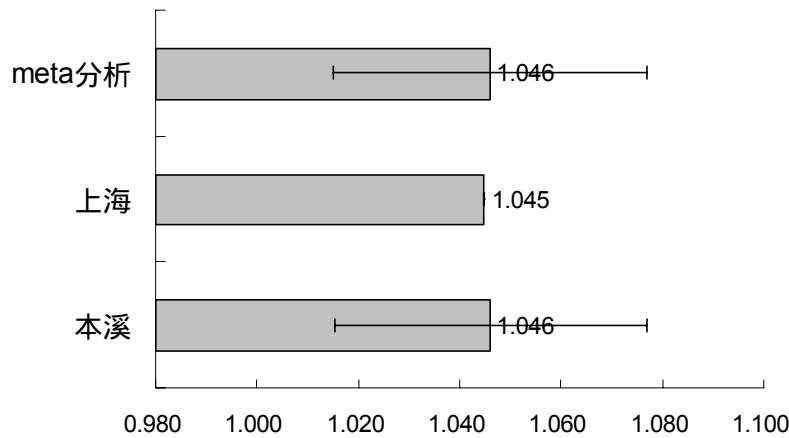
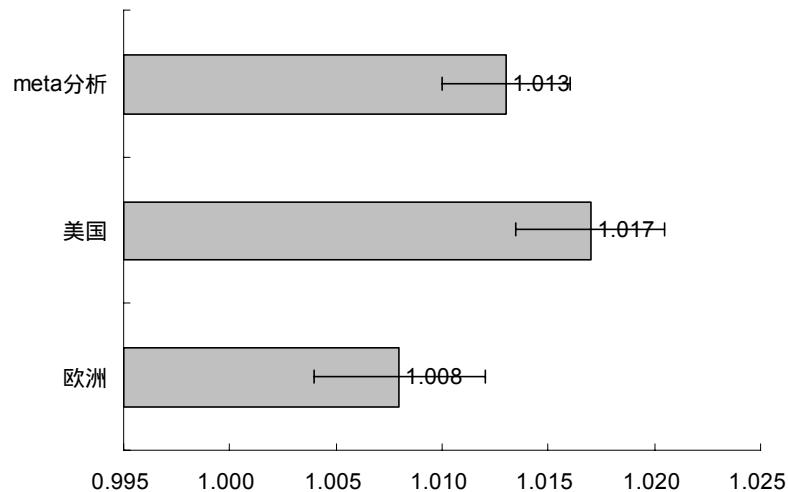
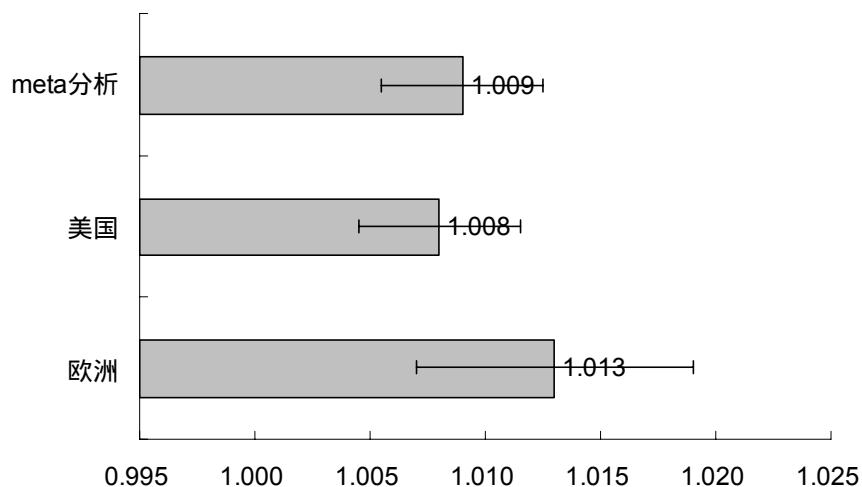
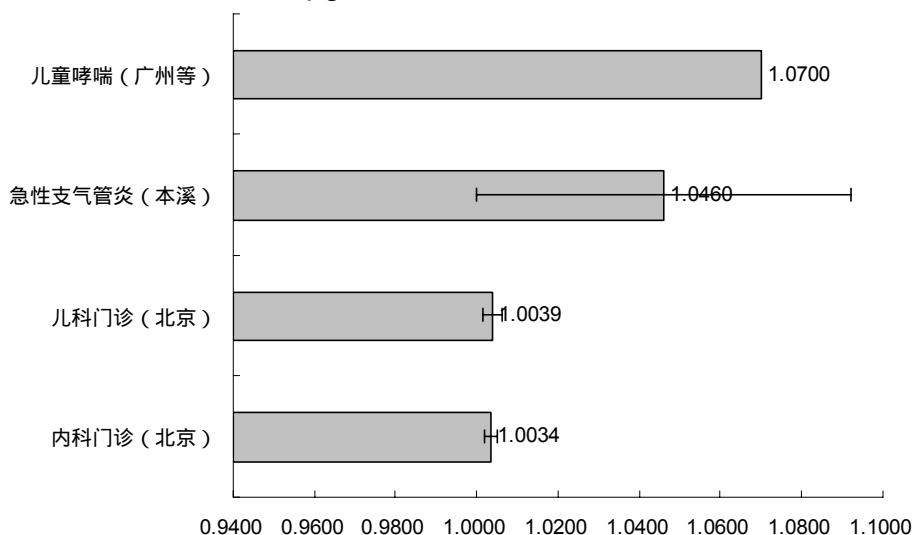


图 8-2 PM₁₀ 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 居民慢性支气管炎发生的相对危险度

图 8-3 PM₁₀ 每升高 10µg/m³，居民呼吸系统住院发生的相对危险度图 8-4 PM₁₀ 每升高 10µg/m³，居民心血管系统住院发生的相对危险度图 8-5 PM₁₀ 每升高 10µg/m³，居民内科门诊、儿科门诊、急性支气管炎、哮喘 (≤15岁) 发生的相对危险度* (*因资料来源所限，未作 meta 分析)

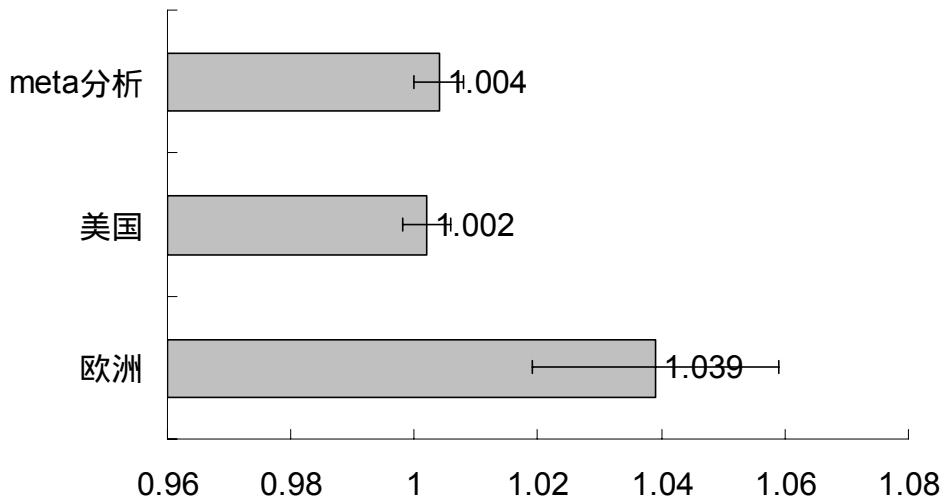


图 8-6 PM_{10} 每升高 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，居民哮喘 (≥ 15 岁) 住院发生的相对危险度

5. 讨论

在与大气污染相关的各种健康效应终点中，死亡无论从健康还是从经济的角度来看都是最为重要的。一般而言，流行病学家多采用时间 - 序列研究和病例 - 交互研究的方法，观察一天或数天大气污染高暴露对人群短期内死亡率上升的影响。但是，这种方法观察到的大气污染与死亡的关系，可能仅仅是由于大气污染将本来已经濒临死亡的患者其死亡日期提前数天或数周而已（即“收获效应”）。很显然，这种效应无法导致大气污染长期暴露后对人群预期寿命的影响。也就是说，急性作用研究仅仅捕捉了一小部分大气污染对人群死亡的影响。而队列研究则观察了大气污染长期暴露对居民生存率的影响，其观察到的效应也远比时间序列等研究反应的短期效应为大。Kunzli 等认为，大气污染长期暴露对死亡率的影响，可以较全面地反应大气污染的健康危害^[32]。因此，本研究采用队列研究的结果反应大气污染暴露对居民死亡的影响。遗憾的是，目前我国尚无此类研究，我们只有采用美国研究的结果。

本次研究采用的暴露 - 反应关系中，相当一部分由于资料来源限制，取自于美国和西欧的研究成果。这就引起了如何把发达国家的研究成果，合理的运用于发展中国家（如我国）的问题。以大气颗粒物污染对居民死亡的影响来说，图 7 为大气颗粒物（为比较方便，统一转换为 PM_{10} 为标志）每升高 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，我国和欧美国家居民总死亡率（包括急性作用和慢性作用）变化的相对危险度及其 95% 可信限。其中欧美国家大气颗粒物污染对居民死亡率的慢性影响资料来源于本 meta 分析结果，急性影响资料源于 Stieb 等对 109 篇文献的综合 meta 分析结果^[33]；我国大气颗粒物污染物对居民死亡率的慢性影响来源在辽宁省本溪进行的一项生态学研究，急性影响资料来源于一项 meta 分析结果^[34]。由图 7 可见，相同的变化浓度下，我国大气颗粒物污染对居民死亡率的影响较欧美发达国家为低。与此类似，欧洲国家某种程度上其暴露反应关系系数也较美国为低。至少就

颗粒物污染与居民死亡的关系来讲，从西方国家得出的暴露反应关系提示，当污染物浓度上升时，其暴露反应关系有平坦的趋势。我们观察到的我国系数较低的现象也与该特征相符。

推测其原因，我们认为这可能与不同国家和地区不尽相同的大气污染水平、当地人口对大气污染的易感性、人口的年龄分布、特别是与不同的颗粒物成分有较大关系。在美国和西欧，颗粒物较多地来源于机动车尾气排放；而我国的大气污染从全国范围内来讲以煤烟型为主，这就使得我国的大气颗粒物成分与发达国家存在较大差异。而毒理学和流行病学研究均证明，机动车来源的颗粒物在各种来源颗粒物中，其对人体健康影响最大。与此同时，欧美国家老年人口，特别是高龄老年人口较多，其大气颗粒物污染的易感人群比例也远较我国为高；同时，由于我国大气颗粒物的浓度远远较欧美国家为高，而高浓度下人群的暴露 - 反应曲线往往趋向平坦。这一系列的因素可能导致了我国与欧美国家颗粒物与人群健康暴露 - 反应系数的差异。因此，理论上说，当发达国家得出的暴露 - 反应关系应用于其它地区（如我国上海），应当对此加以适当调整，以反映当地颗粒物的物理、化学特性，以及当地人群的社会经济状况等。但是，如何加以科学的校正，目前尚无较好的答案。世界卫生组织建议，颗粒物浓度高于 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，由于其暴露 - 反应关系曲线趋于平坦，对其健康效应的评估应该非常小心。从这个角度看，如何把暴露 - 反应关系本地化，是此类评价工作亟需提高的环节。

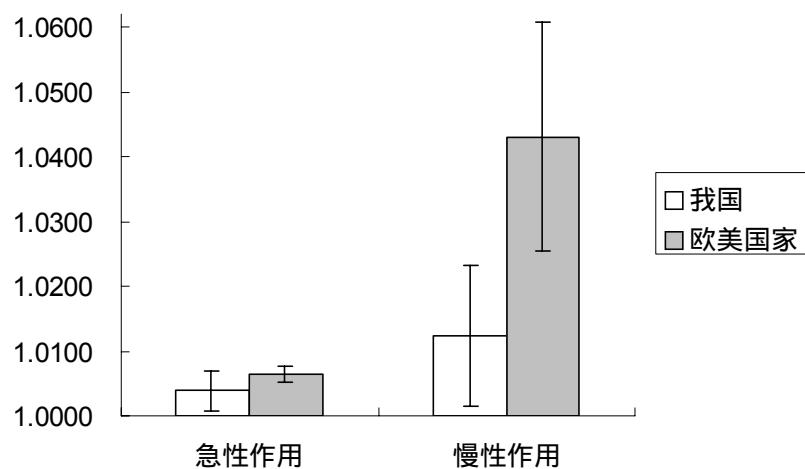


图 8-7 大气 PM_{10} 每升高 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，我国和欧美国家居民总死亡率变化
的相对危险度及其 95% 可信限

当然，将我国某个城市的研究结果应用于另外的城市，由于牵涉到一些修饰因素的差异，存在着许多不确定因素。关于大气污染对居民死亡率的影响，最近的许多工作都提示这种健康效应受很多因素影响。比如，教育程度和抗氧化维生素的摄入情况都是很重要的影响因素，因此弱势人群可能受大气污染的影响更大。另外一个与大气污染存在可能的协同作用的因素是吸烟，因为吸烟在我国男

性中非常普遍。此外，我国由于室内做饭和取暖造成的燃煤型室内空气污染，对居民健康造成的健康威胁也非常大。一般来讲，妇女和儿童较容易暴露于高水平的室内空气污染，因此她们会承担相对较高的健康风险。当然，我们还需深入研究室内外空气污染在我国居民中造成健康危害的相对比例和特征。

综上所述，本文在不同层次的健康效应终点上分析了我国大气颗粒物污染与人群健康效应的暴露 - 反应关系，其结果可直接应用于我国和各城市大气污染相关的健康危险度评价工作。

参考文献：

1. Wilson, R., and Spengler, J. (1996). Particles in our air: concentrations and health effects. Harvard University Press, Boston.
2. Kan, H., Chen, B., Chen, C., Fu, Q., and Chen, M. (2004). An evaluation of public health impact of ambient air pollution under various energy scenarios in Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, 38(1): 95-102.
3. Kan, H., and Chen, B. (2002). Meta analysis of exposure-response functions of air particulate matter and adverse health outcomes in China. *Journal of Environment and Health*, 19(6): 422-424.
4. Teng, E., Hu, W., and Wu, G. (1999). The composing characteristics of elements in coarse and fine particle in air of the four cities in China. *China Environmental Science*, 19: 238-242.
5. Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G., Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. Cities. *N Eng J Med*. 329: 1753-1759.
6. Pope, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S., Speizer, F.E., and Heath, C.W. (1995). Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *Am J Resp Crit Care Med*, 151: 669-674.
7. Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., and Thurston, G.D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287 (9): 1132-1141.
8. Jin, L.B., Qin, Y., and Xu, Z. (2000). Relationship between air pollution and acute and chronic respiratory disease in Benxi. *Journal of Environment and Health*, 17: 268-270.
9. Ma, H.B., and Hong, C.J. (1992) Effects of particulate air pollution on respiratory disease. *Chinese Journal of Public Health*, 11: 229-232.
10. Spix, C., Anderson, H.R., Schwartz, J., Vigotti, M.A., LeTertre, A., Vonk, J.M., Touloumi, G., Balducci, F., Piekarski, T., Bacharova, L., Tobias, A., Ponka, A., and Katsouyanni, K. (1998). Short-term effects of air pollution on hospital admissions of respiratory diseases in Europe: a quantitative summary of APHEA study results. *Air Pollution and Health: a European Approach. Arch Environ Health*, 53(1): 54-64.
11. Wordley, J., Walters, S., and Ayres, J.G. (1997). Short term variations in hospital admissions and mortality and particulate air pollution. *Occup Environ Med*. 54 (2): 108-16.
12. Prescott, G.J., Cohen, G.R., Elton, R.A., Fowkes, F.G., and Agius, R.M. (1998). Urban air pollution and cardiopulmonary ill health: a 14.5 year time series study. *Occup Environ Med*. 55 (10): 697-704.
13. Thurston, G.D., Ito, K., Hayes, C.G., Bates, D.V., and Lippmann, M. (1994).

- Respiratory hospital admissions and summertime haze air pollution in Toronto, Ontario: consideration of the role of acid aerosols. *Environ Res*, 65(2): 271-290.
14. Schwartz, J. (1994a). Air pollution and hospital admissions for the elderly in Detroit, Michigan. *Am J Respir Crit Care Med*, 150(3): 648-655.
 15. Schwartz, J. (1994b). Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, Alabama. *Am J Epidemiol*, 139(6): 589-598.
 16. Schwartz, J. (1994c). PM₁₀, ozone, and hospital admissions for the elderly in Minneapolis-St. Paul, Minnesota. *Arch Environ Health*, 49(5): 366-374.
 17. Schwartz, J. (1995). Short term fluctuations in air pollution and hospital admissions of the elderly for respiratory disease. *Thorax*, 50(5): 531-538.
 18. Schwartz, J. (1996). Air pollution and hospital admissions for respiratory disease. *Epidemiology*, 7(1): 20-28.
 19. Schwartz, J., Spix, C., Touloumi, G., Bacharova, L., Barumamdzadeh, T., Tertre, A., Piekarski, T., Ponce, A., Ponka, A., Rossi, G., Saez, M., and Schouten, J.P. (1996). Methodological issues in studies of air pollution and daily counts of deaths or hospital admissions. *J Epidemiol Community Health*. 50 Suppl 1:S3-11.
 20. Burnett, R.T., Cakmak, S., Brook, J.R., and Krewski, D. (1997). The role of particulate size and chemistry in the association between summertime ambient air pollution and hospitalization for cardiopulmonary diseases. *Environ Health Perspect*. 105 (6): 614-620.
 21. Medina, S., Tertre, A., and Dusseux, E. (1997). Evaluation des Risques de la Pollution Urbaine sur la Santé (ERPURS). Analyse des liens à court terme entre pollution atmosphérique et santé. Resultats 1991-1995, Conseil Regional d'Ile de France.
 22. Poloniecki, J.D., Atkinson, R.W., Leon, A.P., and Anderson, H.R. (1997). Daily time series for cardiovascular hospital admissions and previous day's air pollution in London, UK. *Occup Environ Med*, 54(8): 535-540.
 23. Schwartz, J., and Morris, R. (1995). Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Detroit, Michigan. *Am J Epidemiol*, 142(1): 23-35.
 24. Schwartz, J. (1997). Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Tucson. *Epidemiology*, 8(4): 371-377.
 25. Xu, X., Dockery, D.W., Christiani, D.C., Li, B., and Huang, H. (1995). Association of air pollution with hospital outpatient visits in Beijing. *Arch Environ Health*, 50(3): 214-220.
 26. Wei, F., Hu, W., and Teng, E. (2000). Relation analysis of air pollution and children's respiratory system disease prevalence. *China Environmental Science*, 20(3): 220-224.
 27. Dusseldorp, A., Kruize, H., Brunekreef, B., Hofschreuder, P., Meer, G., and Oudvorst, A.B. (1995). Association of PM₁₀ and airborne iron with respiratory health of adults living near a steel factory. *Am J Respir Crit Care Med*, 152: 1032-1039.
 28. Hiltermann, T.J., Stolk, J., Zee, S.C., Brunekreef, B., Bruijne, C.R., Fischer, P.H., Ameling, C.B., Sterk, P.J., Hiemstra, P.S., and Bree, L. (1998). Asthma severity and susceptibility to air pollution. *Eur Respir J*, 11: 686-693.
 29. Neukirch, F., Segala, C., Moullec, Y., Korobaeff, M., and Aubier, M. (1998). Short-term effects of low-level winter pollution on respiratory health of asthmatic adults. *Arch Environ Health*, 53: 320-328.
 30. Ostro, B.D., Lipsett, M.J., Wiener, M.B., and Selner, J.C. (1991). Asthmatic responses to airborne acid aerosols. *Am J Public Health*, 81(6): 694-702.
 31. Pope, C.A., Dockery, D.W., Spengler, J.D., and Raizenne, M.E. (1991). Respiratory health and PM₁₀ pollution: A daily time series analysis. *Am Rev Respir Dis*, 144:

- 668-674.
32. Kunzli, N., Medina, S., Kaiser, R., Quenel, P., Horak, F., and Studnicka, M. (2001). Assessment of deaths attributable to air pollution: should we use risk estimates based on time series or on cohort studies? *Am J Epidemiol*, 153(11): 1050-1055.
33. Stieb, D.M., Judek, S., and Burnett, R.T. (2002). Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season. *J Air Waste Manag Assoc*, 52: 470-484.

第九章 伤残调整生命年(DALY)在大气污染健康危险度评价中的应用

1. 前言

过去10~20年的流行病学研究证实，大气污染会导致疾病或死亡，与大气污染有关的健康效应包括了呼吸系统症状、肺功能降低、住院率增加、慢性支气管炎、死亡等。在这些污染物中，颗粒物---分为TSP(总悬浮颗粒)，PM₁₀(直径小于10微米的悬浮颗粒)，PM_{2.5}(直径小于2.5微米的悬浮颗粒)，或黑烟—被认为是导致这些健康效应终点的主要污染物。

已经有很多证据表明大气污染与不良健康效应间的关联。目前研究的焦点已逐渐转向如何定量化评定大气污染对公众健康的影响和随后的成本—效益分析。事实上，一些研究已经开始从卫生学和经济学角度评估大气污染所致的健康损害^{[1][2]}。

DALY(伤残调整生命年)是衡量疾病负担的一个标准，包括由于早死所致的生存年数减少、疾病和残疾导致的健康生命损失。因此，DALY是一个可以用来衡量大气污染相关健康损失的较好的指标。

在一个寻求居民健康和可持续发展的时代中，城市空气质量正成为一个重大的公共卫生问题。每年，全球由于空气污染导致的死亡人数估计超过2700,000，其中城市人口占33%^[3]。在中国最大的城市---上海，超过13000,000的居民暴露于空气颗粒物，而该颗粒物水平远远超过西方国家民众的正常暴露水平。因此，本研究尝试用DALY这个指标来估算上海市大气污染对居民健康造成的疾病负担，为决策者控制大气污染、改善空气质量提供理论依据。

2. 方法

2.1 空气污染浓度

在本研究中，MARKAL优化模型被用于估算上海市2000年大气污染物排放场景。MARKAL是一种动态线性规划模型，一个MARKAL模型是一个区域经济的表现。关于MARKAL模型在上海能源和环境政策上的运用参见其他文献^[4]。

基于矩阵转换的原则，一种快速空气质量模型(暴露水平模型)将MARKAL模型的排放场景和空气污染物浓度情况联系起来。

该模型的基本矩阵是通过对SO₂和PM₁₀进行一个长程的传送和沉淀模型(ATMOS模型)来输入。ATMOS模型是一个由三个阶层组成的Lagrangian模型。在本研究中，ATMOS模型提供了上海全市4km×4km网格的SO₂和PM₁₀浓度。包括上海市区及郊区，总面积6341km²被划分为487个网格。基于ATMOS模型的矩阵输出，上海暴露水平模型在Excel软件基础上被改进，从而与MARKAL的预测和为健康影响分析提供暴露水平。

2.2 人群暴露于大气污染的水平

大气污染由各种不同污染物混合而成（例如：臭氧，SO₂，NO₂，颗粒物，CO）。但是，这些污染物质间是相互联系的。因此，在大部份的流行病学研究中，简单地将健康效应归因于一个特定的污染物是不可能的。当健康效应同时与几个污染物质有关，并被简单叠加评估时，一个被称为“加倍计算效应”的问题就会出现。本研究中，PM₁₀ 被选择作为空气污染的指示物来评估相关健康效应，是由于在所有空气污染中，PM₁₀ 与不良健康效应之间的流行病学关联最为强烈。本研究的选择与其他类似的评估相一致^[5]。

上海市区及郊区的所有人口都被纳入本研究的暴露人群中。基于上海市统计局收集的人口数据资料，对每 4km×4km 网格的居民数量进行估计。结合每个单位格的 PM₁₀ 水平和人口数据，我们对 2000 年上海大气污染的人口暴露水平进行了评估。

2.3 健康效应评估

为了评估大气污染对人群健康的影响，我们参考了公开出版的大气污染和健康研究研究，使用各研究中得到的浓度—效应 (C-R) 系数。

每个健康终点的 PM₁₀ 的暴露 - 效应系数被用来定量评估在各种不同场景下大气污染对健康的影响。由于大部份大气污染和健康效应的流行病学研究基于 Poisson 回归形式的相对危险度模型，在给定浓度 C 的情况下，病例数可以用下式算出：

$$E = \exp(\beta \times (C - C_0)) \times E_0 \quad (1)$$

在方程 (1) 中，C 和 C₀ 分别是特定场景和基础场景下的 PM₁₀ 浓度，E 和 E₀ 是 C 和 C₀ 的浓度下相应的健康效应例数。E 和 E₀ 的区别之处在于相对于基础场景下对健康的影响(受益/受损)。

不同健康效应终点的基线发生率数据(E₀)是采用上海的实测数据、或以中国其它地区推算出来的数据、或全国水平。这些数据通常采用的是年发生率。

2.4 大气污染造成的 DALY 损失估计

在本研究中，我们所采用的是世界银行推荐的方法^[6]，尝试用 DALY 来表达大气污染的健康影响。比如，因大气污染每死亡一个人就损失 10 个 DALY。但是，由于在大气污染剂量 - 效应研究 DALY 损失中缺乏致病终点评定的相关文献，将大气污染所致患病率转换成 DALY 将会是一个严峻的挑战。

3. 结果

3.1 上海总人群的 PM10 暴露评估

正如上面方法学中所提到的，我们计算了暴露于特定的 PM₁₀ 浓度的人口数量，然后将每 4km X4km 单位格中的数据综合起来。图 1 描述了上海 2000 年暴

露于不同浓度 PM_{10} 的人口百分比。

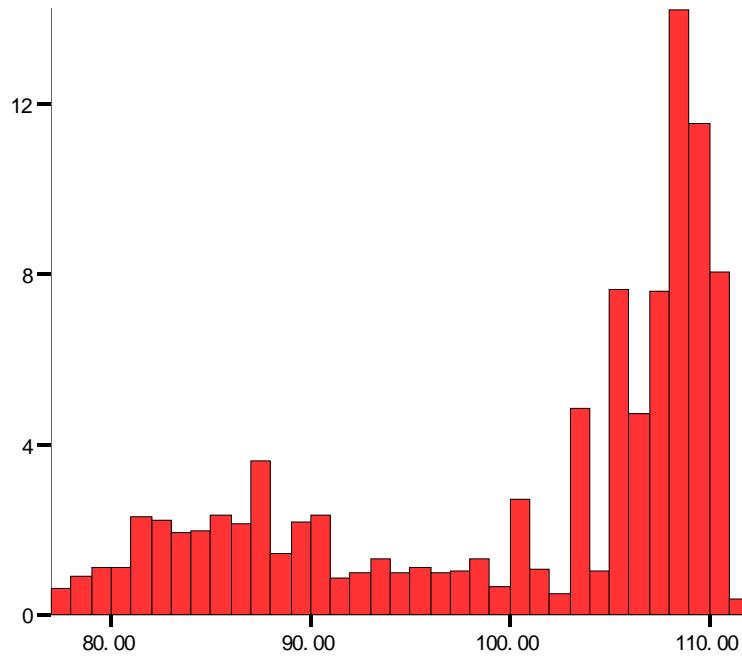


图 9-1. 上海 2000 年暴露于不同浓度 PM_{10} 水平的人口百分比

3.2 健康效应评估

对 2000 年上海城区颗粒物污染所致的疾病分类统计情况见表 1。

上海 2000 年因颗粒物污染导致 8,220 例死亡，16,870 例慢性支气管炎新发病例、5,240 例呼吸系统疾病住院病例、2,690 例心血管疾病住院病例、386,600 例内科门诊病例、40,040 例儿科门诊病例、540,300 例急性支气管炎发病病例和 9,990 例哮喘发作病例。

表 9-1 2000 年上海市区颗粒物污染所致的疾病分类统计表

健康结果	平均值	95% CI
长期死亡率	8,220	5,570-10,870
慢性支气管炎	16,870	7,650-25,880
呼吸系统疾病住院	5,240	540-9,920
心血管系统疾病住院	2,690	1,750-3,610
门诊就诊---内科	386,600	226,300-547,000
门诊就诊---儿科	40,040	14,750-65,320
急性支气管炎	540,300	0-1080,500
哮喘发作	9,990	8,290-11,680

3.3 大气污染所致的 DALY 损失

将大气污染所致的健康效应终点转换成 DALY 值，并通过单位值和定量的健康效应，计算了相应的 DALY 损失，结果见表 2 和表 3。上海 2000 年由于空气污染的总 DALY 损失约为 103,064。在所有的健康效应终点中，早死占了总 DALY 损失值的大部分，约占 79.6%。另外，慢性支气管炎也占了很大一部分。

表 9-2 大气污染相关健康效应终点的 DALY 值

健康效应终点	每 10,000 病例的 DALY 损失
早死	100,000
慢性支气管炎	12,037
呼吸系统疾病住院	264
心血管系统疾病住院	264
门诊就诊---内科	3
门诊就诊---儿科	3
急性支气管炎	4
哮喘发作	4

表 9-3 2000 年上海大气污染所致的 DALY 损失

健康终点	DALY 损失(平均值和 95%CI)
早死	82,200 (55,700-108,700)
慢性支气管炎	20,306 (9,208-31,152)
呼吸系统疾病住院	138 (14-262)
心血管系统疾病住院	71 (46-95)
门诊就诊---内科	116 (68-164)
门诊就诊---儿科	12 (4-20)
急性支气管炎	216 (0-432)
哮喘发作	4 (3-5)
总数	103,064 (65,044-14,0830)

4. 讨论

过去的研究中，评估大气污染对健康影响普遍使用的方法是用疾病成本法(cost-of-illness, COI) 和意愿支付法(willingness-to-pay, WTP)。例如，阚海东等估计2001年上海市区颗粒物污染对健康影响的总花费约为625,400,000美元，为上海市国民生产总值(GDP)的1.03%^[2]。然而，为减少大气污染的健康风险的WTP研究多在发达国家进行，如美国和西欧。在中国，很少进行该类研究，主

要是由于空气污染相关健康效应终点的经济分析必须通过综合先前类似的研究来进行评价。有关人口的特性如年龄分布、收入、健康状况、文化程度等均可能与评估结果有相互影响。举例来说，不同的社会和健康保险系统将会大大影响到当地人群对风险的认知，于是产生不同的WTP来避免风险。因此，将发达国家的WTP值直接套用于对发展中国家的研究也许是不恰当的。

为了处理该问题，本研究尝试引入 DALY 这一概念来评估大气污染对健康的影响。分析结果表明，上海的空气污染对公共卫生的影响是确实存在的。DALY 能够将所有的健康效应---死亡和各种不同的疾病终点归结为一个指标，在这点上它与经济价值评估类似，但它与收入无关。在与不同国家和城市的疾病负担和环境问题所致的疾病负担(如水 - 相关疾病)进行直接比较时，用 DALY 来评估大气污染对健康的负担也有优势，这是因为公共卫生专家为不同国家进行 DALY 评估做了大量工作。例如，世界卫生组织 (WHO) 和世界银行已经把 DALY 作为全球疾病负担(GBD)研究中疾病负担的衡量标准之一。

总之，本研究结果提示，需要把大气污染视为上海地区损害健康的主要因素，并计算出大气污染相关健康损害所带来的潜在的高额社会费用，空气质量的改善能带来巨大的社会健康效益。本研究中推荐的方法也适用于中国其他地区对当地及全国的空气污染和相关健康风险进行评估。

参考文献

1. Kan, H., Chen, B., Chen, C., Fu, Q., Chen, M. (2004). An evaluation of public health impact of ambient air pollution under various energy scenarios in Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, 38(1): 95-102.
2. Kan, H., Chen, B. (2004). Particulate air pollution in urban area of Shanghai, China: health-based economic assessment. *Science of the Total Environment*, 322(1-3): 71-79.
3. WHO, World Health Organization (2004). *WHO Guidelines for air quality*, Fact sheet No. 187. <http://www.who.int/inffs/en/fact187.html>, 2004 Oct 14th cited.
4. Gielen, D., Chen, C. (2001). The CO₂ emission reduction benefits of Chinese energy policies and environmental policies: A case study for Shanghai, period 1995–2020. *Ecological Economics*, 39: 257-270.
5. Kunzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak, F. Jr, Puybonnieux-Texier, V., Quenel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J.C., Sommer, H. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*, 356: 795-801.
6. Lvovsky, K., Hughes, G., Maddison, D., Ostro, B. and Pearce, D. (2000). Environmental costs of fossil fuels: a rapid assessment methods with application to six cities. The World Bank Environment Department Papers, NO. 78. Oct 2000, Washington DC, USA.

第十章 结论与建议

1. 经过 10 余年的城市交通建设，上海的道路交通指标，如人均、车均道路指标等，有了长足的进步。然而，以往以牺牲非机动车道（包括人行道）为代价来扩充机动车通行能力的做法只能缓解瞬时的交通压力，它已经为大面积的交通拥堵埋下了隐患。交通设施不仅包括车行道路，还应考虑非机动车道、人行道和停车场等，尤其道路建设应该为非机动车道和人行道留有足够的空间，以减少机动车和非机动车以及行人之间的相互干扰。
2. 机动车行驶工况和技术调查结果显示，上海市不同区域、不同时段车流量差别较大，但不同区域车流量随时间的变化情况基本一致。车流量高峰主要出现在上午 8:00~9:00、11:00~12:00 和下午 15:00~16:00、18:00~19:00，分别是一天中的上下班时间和商务繁忙的时间。
3. 通过对上海市中心城区、商业区和城乡结合处 3 个区域、9 条道路行驶工况调查显示，不同区域的机动车行驶工况有所区别，其中城乡结合处的交通状况最好，中心城区最差。机动车在各种类型道路上行驶工况特征明显，城市快速干道上的工况最好，平均速度最大，怠速比最小，交通最为顺畅。其次是次干道，主干道的行驶工况最差。
4. 不同类型的机动车行驶工况也有较大差别，但是它们的加速度基本上都集中在 $-0.5\sim+0.5\text{m/s}^2$ 之间变化。机动车不同道路上的速度 - 加速度工况点分布有显著区别，正是这些区别决定了机动车的排放特征。
5. 上海市轿车的平均车龄为 3.65 年，车龄较低，车队的平均日行驶里程为 49.2 公里，80% 以上的轿车是 2000 年以后出厂。目前小轿车大部分是欧 I 或者欧 II 标准的车辆。但是，重型车（如卡车和公交车）排放污染物的控制水平相对较低，应该加大对重型车排放污染的研究和控制。
6. 被测车辆在实际道路上运行时，速度、加速度工况点分布随道路类型不同以及车辆类型而各异。从车辆类型看，轻型车车速较快，平均速度可以达到 $23\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，最高速度可达到 $77.2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ；从道路类型看，快速道路车速快，主干道次之，次干道居末。各种道路上不同类型车流的怠速、加（减）速分布特性反映了实际道路的交通状况。
7. 车辆燃油消耗、空燃比的变化与发动机输出功率之间的响应，使得车辆在运行过程中表现出不同的速度、加速度工况特性，从而影响尾气排放。且 CO、THC、NOx 的实时排放体积浓度，与车速呈一定的规律变化。即使车辆的加速度相同，但是由于车辆处于不同车速，车辆的 CO、THC、NOx 排放速率不尽相同。实测结果显示，车速越低、车辆加速度越频繁对车辆的燃油经济性和排放越不利。因此，加强交通管理不仅可提高交通运能，同时将对降低机动车尾气排放起到积极的促进作用。

8. 被测车辆的排放因子随道路类型、车辆运行状态不同而异，且车辆载重对排放因子影响很大。实测结果显示，被测重型车空载时在城市综合道路上的 CO 平均排放因子为 $5.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $2.1\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $6.5\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，而其在满载时 CO 平均排放因子为 $22.5\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $2.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $7.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ；公交车在其固有路线上 CO 平均排放因子为 $3.6\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $2.1\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，NOx 为 $4.7\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ ；轻型车 CO 平均排放因子为 $1.0\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ，THC 为 $0.6\text{g}\cdot\text{k m}^{-1}$ ，NOx 为 $4.0\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 。
9. 上海市机动车 CO、VOC、NOx、PM 以及 CO₂ 年排放量分别达到 42.1 万吨、6.4 万吨、6.6 万吨、0.17 万吨和 753 万吨，其中 CO、VOC 以及 PM 有将近 20% ~ 30% 来自启动排放，全天的排放主要集中在上午 8:00 段以及下午 15:00 和 17:00 段的上下班高峰时期，这些时间段由于车流量大，路况较差，使其排放量占到排放总量的 80% ~ 90% 左右。
10. 重型车是目前影响上海市环境空气质量的主要因素之一，其 NOx 和 PM₁₀ 排放量分别占机动车排放总量的 67% 和 54%，重型车单位公里的 NOx 和 PM₁₀ 排放系数是轻型柴油车的 2 倍 ~ 4 倍。尤其是在公交线路停靠站附近和交通路口，车辆启动离站和急加速通过交通路口所产生的瞬间排放是正常行驶状态的 10 倍，甚至于更高。其对城市环境造成的污染不可忽视。
11. 从各种机动车对污染物排放的贡献率来看，助动车和重型车（包括公交巴士和卡车）的污染水平最高，这些车辆在全市机动车的行驶里程中分别占到 14.9%、8.3% 和 10.1%，但却造成 51% 的 CO 排放，74% 的 VOC 排放，69% 的 NOx 排放以及 92% 的 PM 排放，已经成为上海市交通污染排放的主要来源，将对全市大气环境质量和人体健康产生巨大的影响。轻型车如乘用车、出租车和摩托由于车龄较新，发动机及尾气排放技术也较为先进，其整体排放水平较低。
12. 对柴油车而言，尾气排放除中含有 CO、THC 和 NOx 等污染物外，还含有大量对人体健康有害的细微颗粒物（PM₁₀），但是由于受仪器和方法所限，本实验研究未能同步开展 PM₁₀ 排放因子的实际测量，该研究有待今后进一步补充与完善。
13. 从上海市交通可持续发展的观点来看，燃油助动车这一“移动的烟囱”将必须实施淘汰，以燃气或者电动助动车作为替代；重型车应逐步实现清洁化，严化重型车排放标准，发展高性能、低污染、大吨位的重型运输车。
14. 上海市大气污染已逐渐转变为石油型和煤烟型并重的复合污染，环境空气质量状况不容乐观，全市大气污染物以可吸入颗粒物和氮氧化物为主。从 1990 年到 2003 年，受机动车保有量增加的影响，上海市全市 NOx 平均浓度呈上升趋势，2003 年 NOx 浓度是 1990 年的 1.75 倍。近年来随着机动车污染控制措施的实施，中心城区 NOx 浓度的上升趋势得到控制，但郊县 NOx 浓度仍

在增加。全市 NO_x 浓度季节变化明显，冬季浓度最高，夏季浓度最低。全市 NO_x 污染的区域分布呈现城区大于郊区、郊区大于郊县的状况。城区主要交通干线污染状况严重，NO_x 小时浓度普遍超标，18 个监测点中有 13 个站点超标率大于 70%，延安东路监测点小时平均浓度最高，达到 0.469 mg/m³。多数站点 PM₁₀ 小时浓度变化不大，范围在 0.075 mg/m³ 到 0.326 mg/m³ 之间。CO 小时平均浓度仅延安东路监测点超标率 8%，其他各点均未超标。PM₁₀ 浓度春季受北方沙尘天气影响，保持较高水平，而秋季浓度最低。

15. “十一·五”期间上海市机动车保有量增长速度明显高于经济增长速度，由此产生的排放量将显著增加，实施欧洲 III 号标准可以部分减缓机动车排放增长速度，但是尚不足以有效遏止机动车的排放增长态势。因此，为改善上海环境空气质量，建议上海市政府可考虑提前实施欧洲 IV 排放标准，以取得机动车污染控制的主动。
16. 考虑到机动车的流动性和外来车辆的管理，上海市应主动与江浙两省交通与环境保护部门取得联系，实施区域性的机动车污染控制计划和相互认可制度，全面改善长三角的环境空气质量。