

北大-林肯中心 2016-2017 年度“研究基金”项目

项目编号: FS05-2-161101-SJ

项目名称

新型城镇化进程中城市交通碳排放形成机理
及供给侧对策研究

承担单位:

上海交通大学

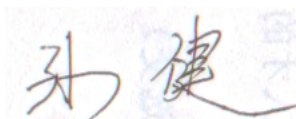
船舶海洋与建筑工程学院/智能交通与无人机应用研究中心

2017 年 7 月

研究报告原创性声明

本人郑重声明: 所呈交的研究报告, 是本团队独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外, 本报告不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

项目负责人签名:

Handwritten signature in blue ink, appearing to read '孙健' (Sun Jian).

日期: 2017 年 7 月 28 日

项目组成员名单

组 长:	孙健	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	教授
成 员:	彭仲仁	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	教授
	朱祎	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	特别研究员
	路庆昌	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	讲 师
	倪训友	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	博士生
	尹志伟	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	博士生
	叶颖微	上海交通大学 船舶海洋 与建筑工程学院	硕士生

摘 要

本课题以当今快速城市化和机动化进程中的城市道路交通系统为对象,通过多种手段研究城市交通碳排放形成机理及评估体系,为进一步实现降低城市道路交通系统碳排放,建立低碳导向型城市交通奠定基础。课题拟通过采用数据装备车及人工手持等多源移动监测载体,搭载不同传感器获得多源交通相关碳排放数据,并结合微观仿真结果,标定不同车辆类型的排放因子;研究不同影响因素对城市交通碳排放的作用机理,提出城市交通系统碳排放的形成、扩散模型;在此基础上,通过统计学方法建立城市交通系统碳排放评估体系。同时,研究还将从把握我国城市交通系统碳排放的主要特征和影响因素出发,分析低碳导向在城市交通系统中的具体体现,为进一步探索适合我国特色的城市低碳交通发展战略及策略体系(含微观引导策略和宏观政策)奠定基础。研究成果将对把握我国城市交通系统碳排放发展趋势,构建面向低碳导向型的城市交通网络优化、管理及控制的理论体系起到基础性作用。

关键词: 碳排放; 移动监测; 城市交通; 低碳导向; 理论体系

目 录

摘 要.....	II
目 录.....	III
表 目 录.....	V
图 目 录.....	VII
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目标与研究内容.....	2
1.2.1 研究目标.....	2
1.2.2 研究内容.....	3
1.2.3 课题应用前景.....	4
1.3 研究框架.....	5
第二章 国内外研究概况.....	8
2.1 国外研究.....	8
2.1.1 城市路网交通系统碳排放监测研究.....	8
2.1.2 城市交通碳排放分布模型及评估体系研究.....	9
2.1.3 城市低碳交通发展策略研究.....	10
2.2 国内研究.....	11
2.2.1 城市路网交通系统碳排放监测研究.....	11
2.2.2 城市交通碳排放分布模型及评估体系研究.....	12
2.2.3 城市低碳交通发展策略研究.....	13
2.3 国内外研究述评.....	13
第三章 碳排放移动监测实验方案设计.....	17
3.1 碳排放移动监测区域及设备选型.....	17
3.1.1 监测对象.....	17
3.1.2 监测区域.....	17
3.1.3 监测设备及载运工具.....	20
3.2 多维度碳排放大数据移动监测方法.....	23
3.2.1 机动车运行数据及排放因子检测.....	23
3.2.2 基于路侧检测设备的碳排放扩散监测.....	26
第四章 城市道路机动车辆排放实验.....	28
4.1 道路及交通流数据采集.....	28
4.2 机动车行驶特征及碳排放数据采集.....	34
第五章 基于大数据移动监测的城市交通碳排放形成机理研究.....	37
5.1 机动车碳排放形成机理研究.....	37
5.1.1 道路排放源分类分级体系确定.....	37
5.1.2 道路移动排放源排放过程.....	38

5.1.3 机动车尾气排放因子计算.....	40
5.2 宏观交通碳排放研究.....	42
5.3 中观交通碳排放研究.....	45
5.4 微观交通碳排放研究.....	55
5.4.1 速度对碳排放影响分析.....	58
5.4.2 加速度对碳排放影响分析.....	58
5.4.3 转速对碳排放影响分析.....	59
5.4.4 VSP 对碳排放影响分析.....	60
5.4.5 机动车行驶特性与碳排放相关性.....	61
5.5 本章小结.....	62
第六章 城市交通碳排放分布研究与实证.....	63
6.1 影响碳排放物扩散的因素分析.....	63
6.2 城市开阔道路线源碳排放污染物扩散模式.....	65
6.3 城市交叉口扩散模式.....	68
6.4 城市街道峡谷扩散模式.....	79
6.5 本章小结.....	83
第七章 低碳视域下的城市交通发展战略与供给侧对策.....	84
7.1 上海未来交通碳排放情况预测.....	84
7.2 低碳交通供给侧对策研究.....	88
7.2.1 发展政策.....	88
7.2.2 发展理论方法.....	89
7.2.3 发展技术手段.....	90
7.2.4 发展管理.....	91
7.3 本章小结.....	92
参考文献.....	93

表 目 录

表 2-1 以低碳为导向的路径选择优化相关研究.....	16
表 3-1 实验监测设备参数.....	20
表 3-2 载运工具参数.....	23
表 3-3 主要车型排放因子.....	25
表 4-1 上海市监测路网断面信息.....	28
表 4-2 太原市监测路网道路断面信息.....	29
表 4-3 上海市监测路网交通流数据.....	29
表 4-4 太原市监测路网交通流数据.....	29
表 4-5 上海市监测路网交叉口渠化及信号配.....	30
表 4-6 上海市监测路网交叉口机动车转向比例.....	33
表 4-7 OBEAS-3000 采集行驶特征及碳排放数据字段示例.....	35
表 5-1 道路机动车三级分类体系.....	38
表 5-2 燃油碳排放数据.....	43
表 5-3 道路机动车年平均行驶里程.....	43
表 5-4 机动车百公里燃油消耗量.....	43
表 5-5 上海市各类机动车保有量.....	44
表 5-6 上海市客运碳排放总量.....	44
表 5-7 上海市货运碳排放总量.....	44
表 5-8 上海市客货运周转量及碳排放强度.....	44
表 5-9 测试车辆基本信息.....	46
表 5-10 中观层次行驶及碳排放数据.....	47
表 5-11 不同 VSP 区间数据所占比重.....	47
表 5-12 小型载客车 VSP 的 Bin 区间所对应的尾气排放率.....	50
表 5-13 重型车 VSP 的 Bin 区间所对应的尾气排放率.....	52
表 5-14 微观机动车行驶状态及碳排放数据示例.....	56
表 5-15 碳排放污染物同机动车行驶参数相关性.....	61
表 6-1 垂直扩散系数回归系数和指数值.....	66
表 6-2 初始垂直扩散系数.....	67
表 6-3 常规水平横风扩散系数.....	67
表 6-4 水平扩散系数回归系数和指数值.....	67
表 6-5 高斯线源模型碳排放扩散模拟情况 (实验一) (mg/m^3).....	67
表 6-6 高斯线源模型碳排放扩散模拟情况 (实验二) (mg/m^3).....	68
表 6-7 沪闵路-剑川路交叉口测试点 CO 排放源强与模拟浓度.....	76

表 6-8 沪闵路-剑川路交叉口东进口道 CO 排放量 (mg/m ³)	76
表 6-9 沪闵路-剑川路交叉口西进口道 CO 排放量 (mg/m ³)	76
表 6-10 沪闵路-剑川路交叉口南进口道 CO 排放量 (mg/m ³)	76
表 6-11 沪闵路-剑川路交叉口北进口道 CO 排放量 (mg/m ³)	76
表 6-12 CO 实测值与模拟值对比 (mg/m ³)	77
表 6-13 关心区域不同方向及位置 CO 分布情况 (mg/m ³)	83
表 7-1 上海市货运交通部门发展现状.....	85
表 7-2 上海市客运交通部门发展现状.....	86
表 7-3 转型情景上海市交通部门能耗及碳排放情况 (2010-2050)	87
表 7-4 弱干预情景上海市交通部门能耗及碳排放情况 (2010-2050)	87
表 7-5 强干预情景上海市交通部门能耗及碳排放情况 (2010-2050)	88

图 目 录

图 1-1 研究技术路线.....	6
图 3-1 碳排放实验监测区域.....	19
图 3-2 无锡市通锡高速.....	19
图 3-3 碳排放移动监测设备.....	22
图 3-4 OBEAS-3000 车载排放测试系统.....	24
图 3-5 发动机台架试验.....	24
图 3-6 交通系统综合监测和拍摄系统.....	25
图 3-7 路侧数据采集点示意图.....	26
图 3-8 碳排放空中扩散数据监测设备.....	27
图 4-1 OBEAS-3000 数据采集过程.....	35
图 4-2 机动车碳排放数据采集现场.....	36
图 5-1 发动机进气及排放冲程.....	39
图 5-2 上海市各类机动车碳排放贡献率.....	45
图 5-3 VSP 频数分布.....	47
图 5-4 MOVES Data Manager 参数输入.....	49
图 5-5 实验机动车类型输入.....	49
图 5-6 MOVES 排放物输入.....	50
图 5-7 小型载客汽车碳排放量随 VSP 变化情况.....	54
图 5-8 重型载货汽车碳排放量随 VSP 变化情况.....	54
图 5-9 小型载客汽车 CO ₂ 排放情况.....	55
图 5-10 重型载货汽车 CO ₂ 排放情况.....	55
图 5-11 实验车速度分布.....	57
图 5-12 实验车加速度分布.....	57
图 5-13 CO、HC 排放随速度变化趋势.....	58
图 5-14 CO、HC 排放随加速度变化趋势.....	59
图 5-15 CO、HC 排放随转速变化趋势.....	60
图 5-16 CO、HC 排放随 VSP 变化趋势.....	61
图 6-1 道路线源污染物浓度扩散示意图.....	66
图 6-2 交叉口路段单元划分.....	69
图 6-3 路段单元子片段划分.....	70
图 6-4 红灯时间内排放源强计算示意图.....	71
图 6-5 机动车加速累积排放示意图(起点在 a 区域).....	72
图 6-6 机动车加速累积排放示意图(起点在 b 区域).....	72

图 6-7 CALINE4 模型运行示意图.....	75
图 6-8 CO 浓度实测均值与模拟均值对比.....	78
图 6-9 交叉口各进口道 CO 排放量.....	79
图 6-10 徐家汇 CBD 区域路网及建筑物.....	81
图 6-11 气象、地形及排放数据预处理.....	82
图 6-12 徐家汇 CBD 区域 CO 浓度分布情况.....	82

第一章 绪论

1.1 研究背景

进入 21 世纪以来,随着全球人口和经济规模的增长,能源使用带来的环境问题及其诱因也不断地为人们所认识。不止是烟雾、光化学烟雾和酸雨等的危害,大气中二氧化碳(CO₂)浓度升高带来的全球气候变化也已被确认为不争的事实。特别是近年来,我国频发全国性的区域雾霾天气、PM_{2.5} 污染等一系列与碳排放的相关问题,更引起全社会对碳减排的高度重视。2009 年,《联合国气候变化框架公约》第 15 次缔约方会议暨《京都议定书》第 5 次缔约方会议(哥本哈根气候大会),世界各国均在《京都议定书》框架下对本国碳排放总量进行规划。我国承诺到 2020 年将万元 GDP 碳排放量较 2005 年减少 40%-45%,这一目标对社会各行业碳减排均提出严峻挑战。改革开放以来,随着我国社会经济的飞速发展,能源消耗与碳排放量不断增长,预计到 2020 年我国能源需求总量将达到 51.6 亿吨标煤~~错误!未找到引用源。~~。据统计研究,截止 2007 年,我国交通运输领域能源消耗已达 4.36 亿吨标煤,较 1994 年增长了 160%,交通运输已经成为能源消耗增长最快的领域之一,交通系统碳排放占我国碳排放总量近 30%,减少交通能源消耗与碳排放刻不容缓。基于此,人们开始重新审视交通与环境二者的相互关系,在现有交通需求量和车辆技术水平条件下,利用基于路网的控制策略,从供给侧的角度,通过交通诱导、交通限行、信号控制等手段来调节路上交通流量和车辆行驶状态,进而实现整体路网的排放削减。建立低碳导向型城市交通系统、推动城市交通系统碳减排,已成为事关我国新型城镇化建设和碳减排总体目标的实现与否的重要战略环节,需要展开深入系统的理论研究和实践应用。

当前,面对我国城市交通系统碳减排的迫切需求,亟需构建低碳导向型的城市交通系统,并对该系统进行合理优化和科学管理。为此,需要清晰把握城市交通系统碳排放的机理,科学评估城市交通系统碳排放特征和主要影响因素,准确判断城市交通系统碳排放的发展趋势,特别是城市交通碳排放形成机理及分布。本研究将

为进一步建立完整的以城市交通低碳排放为导向的交通管理、运营、控制基础理论体系奠定基础,为迈向生态文明走出一条新路——应用新世纪的创新技术与创新机制,通过低碳经济模式与低碳生活方式,实现社会可持续发展。

由于交通碳排放受机动车性能、驾驶行为、路况、交通管理等多种因素影响,减少交通碳排放可通过不同角度进行探索。当前其研究重点是对现有交通管理方式优化,同时考虑良好的驾驶行为也是减少交通碳排放的另一种有效方式。减少城市交通碳排放是一项系统工程,可供选择的方法具有多层次、多角度、多形式的特点。对于特定区域内的城市交通节能减排工作而言,需要全面考量相关环境、综合考虑多种因素,获得科学、系统及可实施的减排方案。

1.2 研究目标与研究内容

1.2.1 研究目标

本课题研究将弥补我国在城市交通碳排放量化评价体系及交通碳排放多维度监测及大数据获取研究领域的不足,在国际上亦属于创新性和前沿性研究范畴。课题具有如下重要理论和现实意义:

(1) 研究建立基于城市交通特征的机动车碳排放量化评价模型,解析城市交通碳排放形成机理,为准确把握我国城市道路交通系统碳排放现状特征提供理论和方法上的指导;

(2) 构建基于大数据移动监测的多维度城市交通碳排放监测体系将充分整合目当前实测交通及碳排放数据,弥补了传统定点监测存在的局限性,实现交通与排放的有效衔接,从而进一步挖掘这些数据的收集和应用价值,从将其应用从交通领域拓展到环境领域,有助于弥补现有的排放模型无法从中观层次对大范围路网机动车排放进行量化,宏观排放模型无法反映路网机动车排放动态变化的缺陷;

(3) 提出基于不同时空分辨率的宏观、中观及微观层次路网机动车排放动态量化评价方法,从而有效提高路网机动车排放量化的精度,有助于环境管理者全面准确的评估城市路网的碳排放污染现状,同时交通数据的实时收集能够保障路网机动车排放量化的可持续性,有助于环境管理者了解掌握路网机动车碳排放的长

期变化规律和未来发展趋势;

(4) 基于对交通碳排放在平面及垂直高度多维度的浓度分布监测, 解析城市交通碳排放的时空分布规律, 为建立城市路网机动车排放动态量化实时显示平台提供理论基础和技术支撑, 从而为合理有效排放控制策略的实施奠定基础, 这也有助于基于路网的碳排放控制理论进一步发展。

(5) 从交通供给角度提出与交通碳排放形成机理相对应的城市低碳交通供给侧对策, 通过科学论证形成城市低碳交通供给侧对策体系。

1.2.2 研究内容

课题研究内容主要涉及大数据移动监测体系、不同影响因素对城市交通碳排放的作用机理, 以及城市交通碳排放分布模型及评估体系研究。具体内容包含:

(1) 大数据移动监测方法体系研究。拟以碳排放移动监测为切入点, 结合手持环境监测设备、环境监测车、车载 OEM (On board Emission Measurement) 设备及排放监测系统等设备, 在排放监测方面的优势和特点, 制定出一套较完备的交通碳排放动态监测体系。基于该监测体系, 选取城市主要交叉口、主干道及其组成路网作为研究地点, 通过采用多种采集方式 (装备车及手持设备), 进行长时间实地调查 (预计 3-6 个月) 获取城市交通碳排放立体监测的多维度大数据, 为进一步研究城市碳排放分布提供数据支持。

(2) 不同影响因素对城市交通碳排放的作用机理研究。根据道路交叉口特征, 选取不同研究方位 (如交叉口入口道、四转角及转角外延方向等), 以不同时间间隔 (如红绿灯周期、小时、天等) 作为时间尺度, 解析不同时段、单一或复合影响参数作用下的道路交叉口碳排放浓度变化规律以及对周围环境的影响机理; 同时, 探索影响参数与碳排放浓度变化的时空定量关系。选取典型主干道或街道, 沿道路水平或垂直方向, 分析碳排放浓度变化以及与气象因子、周边建筑等因素之间的定量关系; 研究街道不同时段内碳排放浓度变化, 揭示影响其变化的主要因素。

(3) 城市交通碳排放分布模型及评估体系研究。采用实地检测数据, 并结合仿真预测与分析方法, 在研究城市道路网交通系统碳排放形成及扩散原理的基础上, 构建城市交通系统碳排放分布模型。同时, 进一步解析不同影响因素对城市交

通碳排放作用机理,研究城市交通碳排放的指标体系和评价模型,建立城市交通系统碳排放评估体系。

(4) 城市交通碳排放供给侧对策研究。针对交通碳排放生成的关键环节,分析目前交通供给在发展低碳交通方面存在的瓶颈;进而以低碳交通为导向,从交通规划、出行路径诱导、交通管理与控制等多个方面提出相应的供给侧对策;最终通过研究供给侧对策的模式、时机、决策依据、供给对需求的满足程度以及不同策略产生的影响和效果等,形成科学、可靠、完备的城市低碳交通供给侧对策体系。

1.2.3 课题应用前景

在当前中国机动化快速增长的前提下,低碳交通运输是实现节能减排、发展低碳经济的重要组成部分。本课题是建立在国家“十二五”节能减排发展规划及建设低碳城市,打造低碳交通要求基础之上,研究内容是国家环保局、交通部及地方政府部门近年来的关注领域。鉴于世界范围内各级城市交通运输近 20 年迅猛增长,在我国,尤其是大、中城市,随着人口和车辆数目的快速上升,交通碳排放增长幅度更为显著,已逐步成为社会可持续发展的瓶颈。同时交通碳排放污染源涉及到机动车、驾驶人员、路网等诸多复杂因素,是城市管理者监测、控制碳排放的重点和难点。本课题拟采取理论解析与实验科学相结合的方法,从交通碳排放形成机理解析入手,充分整合利用先进的交通数据采集、排放数据采集、气象因素采集和机动车行驶数据采集技术,形成一套完备的多维度交通碳排放移动监测体系,结合微观交通仿真,对不同时空分辨率下的城市交通碳排放进行量化评价。同时将地面移动、定点碳排放扩散监测和空中扩散监测有机结合,从多个维度探索城市交通碳排放的时空分布规律。并基于城市交通碳排放的时空分布规律,从供给侧角度提出相应的供给侧对策,建立交通碳排放供给侧对策体系,最终达到减少城市交通碳排放的目的。其最终研究成果将以项目建议书“基于大数据移动监测的城市交通碳排放形成机理及分布研究”的形式展现,针对城市交通碳排放进一步探索适合我国特色的城市低碳交通发展战略及策略体系(含微观引导策略和宏观政策)。研究成果将对把握我国城市交通系统碳排放发展趋势,构建面向低碳导向型的城市交通网络优化、管理及控制的理论体系起到基础性作用。

1.3 研究框架

本课题研究目标是基于多维度大数据移动监测对城市交通碳排放形成机理及分布开展研究。其中，多维度指针对交通碳污染物在不同时间、空间尺度上的排放情况及在水平及垂直高度上的扩散情况进行研究；而大数据移动监测则指利用车载、手持及无人机搭载等多类型移动监测设备对路网碳排放、污染物扩散及交通流状况进行连续监测。最终，本研究将分析碳排放与交通流参数及机动车行驶参数的关系，研究污染物在水平及垂直高度上的时空分布，从而建立城市交通碳排放评估体系。围绕该目标并基于上述研究内容，研究技术路线如图 1-1 所示。

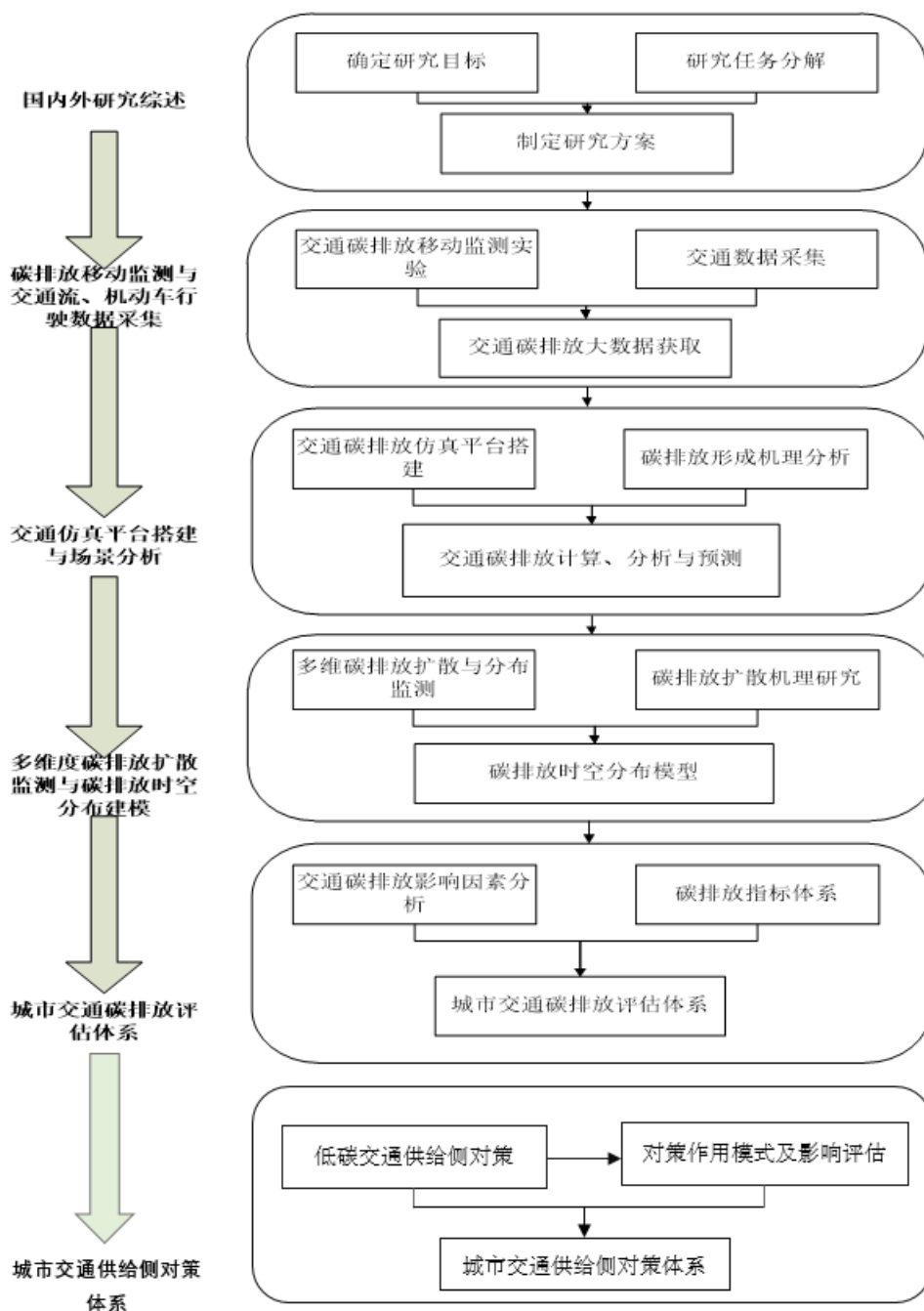


图 1-1 研究技术路线

本研究报告分为七章，各章内容如下：

第一章，**绪论**。简要分析目前城市交通与环境的相互关系及城市交通碳减排的需求，基于上述研究背景提出本文的研究目标、内容和意义。根据研究目标阐述开展研究所用的研究方法和技术路线，并介绍本文的篇章结构。

第二章, **国内外研究概况**。全面综述国内外机动车排放监测及量化评价研究现状, 包括城市路网交通系统碳排放监测研究、城市交通碳排放分布模型及评估体系研究及城市低碳交通发展策略研究三个方面。同时概括了各地以低碳为导向的交通管理方法。通过研究综述分析现有研究的优缺点和问题, 进一步明确本文的研究目标和重点研究内容。

第三章, **碳排放移动监测实验方案设计**。根据本文研究需求确定交通量、速度、车型构成、行驶特征等交通参数以及车辆碳排放及污染物扩散分布数据的移动监测方法, 通过设计合理实验进行大数据采集。

第四章, **城市道路机动车辆排放实验**。从宏观、中观和微观三个层面采用不同的实验及调查方法, 获得不同时空分辨率下的交通碳排放数据。

第五章, **基于大数据移动监测的城市交通碳排放形成机理研究**。利用所采集的不同时空分辨率的交通碳排放数据, 从宏观、中观和微观各层面建立相应的机动车碳排放量化评价体系, 搭建基于碳排放的交通仿真平台, 分析交通碳排放形成机理。

第六章, **城市交通碳排放分布研究与实证**。基于多维度的碳排放扩散浓度监测, 研究城市碳排放污染物的扩散机理, 从水平层面、垂直高度等多个维度对交通碳排放物的分布情况进行分析, 从而了解掌握城市交通碳排放的时空分布规律。

第七章, **低碳视域下的城市交通发展战略与供给侧对策**。以上海城市交通系统为研究对象, 通过对上海未来交通碳排放情况的预测, 从宏观交通政策、中观理论方法、微观技术手段三个层次, 提出低碳视域下的城市交通发展战略。从供给侧的角度, 基于碳排放的形成机理, 以减少交通碳排放为指标重新考察传统交通规划与管理方式, 有针对性地提出低碳导向的交通供给侧对策。

第二章 国内外研究概况

由于交通碳排放受机动车性能、驾驶行为、路况、交通管理等多种因素影响，减少交通碳排放可通过不同角度进行探索。目前，国内外对于城市交通碳排放的研究，主要侧重于**城市路网交通系统（机动车辆）碳排放监测研究、城市交通碳排放分布模型及评估体系研究以及城市低碳交通发展策略研究**等方面。其中，低碳交通发展策略及实践方法主要包含：面向管理者的交通规划与管理，以及面向驾驶员的驾驶行为诱导和路径选择优化。以下将对上述内容，分别从国内外城市交通碳排放研究的角度进行综述，说明其研究成果及不足之处。

2.1 国外研究

2.1.1 城市路网交通系统碳排放监测研究。

对于城市路网交通系统碳排放的研究，其主流研究方法是通过移动监测获取碳排放数据结合实验室模拟实验来监测城市交通系统碳排放，主要包括机动车碳排放因子检测、道路碳排放分布及扩散监测和碳排放空中扩散监测。在**碳排放因子检测**方面，台架测试法（Chassis Dynamometer Test）是发展最早，应用也最为广泛的一种排放测试方法。该方法利用实验室内的底盘测功机模拟车辆在实际道路上的行驶，并利用定容采样系统（CVS）和气体分析仪对车辆尾气进行稀释和测量，可同时收集得到尾气排放浓度和排放质量数据。Schauer 等[1]利用台架实验检测了不同类型机动车的 HC（以 C1-C32 为研究对象）排放因子，通过发动机台架模拟多种类型发动机的综合工况，获取综合工况下的碳排放因子。该方法能够有效揭示发动机碳排放的影响因素，准确测出发动机的排放因子。其不足之处为仅测试尾气排放，不包括挥发、泄漏等非尾气排放环节，且模拟工况与实际工况存在一定差别，难以代表一个城市或地区的实际机动车平均排放水平。车载尾气检测技术（Portable Emission Measurement System, PEMS）是 2000 年之后兴起的尾气排放测试新方法。车载检测设备具有重量轻、体积小特点，能够方便快捷的安放在测试车辆上，在车辆实际行驶过程中对其尾气进行直接采样分析，获得车辆逐秒的排放浓度和排放质量，同时还可实时记录车辆的行驶速度和经纬度信息。其最大特点在于摆脱实验室台架测试不能模拟实时路上行驶模式的缺陷，可获得各种类型车辆在不同路

段、时段和交通状态下的尾气排放数据,适用于对车辆行驶排放的影响变化进行深入细致研究。DeFries 等[2]利用车载尾气检测技术(On - Board Emission Measurement, OEM)检测了小型车的燃油消耗及二氧化碳排放数据。对比实验结果显示, OEM 检测数据与底盘测功机实验数据密切匹配,验证了该方法在碳排放检测中的有效性。关于**道路碳排放分布监测**的研究, Claggett 等[3]对城市交叉口碳排放浓度进行实时监测,发现由于环境和交通的不确定性因素导致扩散模型所得的碳排放浓度与实际相比误差较大。由此看出,综合实测气象及交通数据对碳排放研究非常重要。Baldauf 等[4]结合定点监测、移动监测及风洞试验三种方法研究交通排放污染物(NO_x 、 CO_x)在路测的扩散情况。通过在路测设置四个监测站定点监测交通污染物的实时排放,同时,在主路同侧分别选取坡度不同的两条支路,利用移动监测设备监测污染物沿路测扩散情况,研究道路坡度对污染物扩散的影响。最后,利用风洞试验研究风速及建筑对污染物扩散的影响,通过对比分析揭示了跨线桥等建筑物对碳排放扩散的阻碍作用。

碳排放空中扩散数据主要利用无人机与遥感技术进行监测。White 等[5]利用无人机搭载空气传播传感器采集了污染物空中扩散数据,通过建立污染物云边界的样条多边形模型,来分析污染物的扩散及分布情况。Bouhamra & Abdul-Wahab[6]研究了气象因子影响下交通碳排放日变化情况,发现在低风速时段污染物扩散速度较为缓慢,监测点的碳排放浓度相对较高;并指出交通高峰期时段对排放贡献较大。Tomlin 等[7]以伦敦市中心为研究区域,分析风速风向、交通流等对碳排放度的影响,发现复杂城市风向特征、天气模式、交通排队位置及建筑形态是影响碳排放浓度的主要因素。Dirk 等[8]提出基于风向风速预测交通碳排放的半经验模型;在此基础上, Gokhale&Pandianb[9]对其进行改进,进一步考虑风向角及车辆启动等因素,提升了模型的预测精度。国外研究中,其他常见机动车尾气污染扩散模型还包括 HIWAY 模型、CALINE 模型、CAL3QHC 模型和 ADMS 模型等[10]。Ritner 等[11]以交叉口为研究对象,利用排放模型 MOVES 计算机动车加、减速时所对应的排放因子,输入到 CAL3QHC 扩散模型中,从而获得更为精准的交叉口交通污染物浓度分布模型。同时,国外学者将人工神经网络主要应用于对交通相关污染物空间分布的预测[12]。

2.1.2 城市交通碳排放分布模型及评估体系研究。

影响交通碳排放的主要因素可分为交通设计和交通管理两类,其中设计因素包括道路坡度、坡长、平曲线和纵曲线等,管理因素包括信号控制、限速设置等[13, 14]。通过实测数据结合仿真分析来预测城市交通系统碳排放是主流的研究方法。Bartin 等[15]以美国新泽西州不停车收费系统为研究对象,基于微观仿真,通过排放模型 Mobile6.2 与交通仿真软件 Paramics 结合,评估了不停车收费系统对交通排放的影响。MOVES 模型由美国环保局开发,并将微观、中观到宏观三个层次的排放量化采用逐层集计的思路统一于同一模型。Hattem 等[16]基于 VISSIM 及 MOVES 研究了交通量、速度、重车比、道路坡度等因素对机动车二氧化碳排放的影响。研究结果显示,速度是影响机动车二氧化碳排放的最主要因素,当速度维持在 55mph 至 60mph 之间时,二氧化碳排放量明显下降。Perez 等[17]以交通拥挤道路为研究对象,将人工神经网络应用于对交通相关污染物空间分布的预测,对比结果表明其预测准确性高于多元线性回归模型。John 等[18]利用 GIS 基于排放模型及大气扩散模型建立了交通污染物在平面上的时空分布模型,研究交通污染物扩散对行人暴露浓度的影响。对交通排放评价体系建立方法包括专家评价法、层次分析法和模糊综合评判、数据包络分析法(DEA)、层次分析法等,其涉及的主要评价指标包括流量、限速、重车比和坡度等[19]。宏观层面,路网机动车排放量化评价主要用于分析区域路网机动车排放污染现状和逐年变化趋势。目前,国际上宏观层面路网机动车排放量化研究主要基于美国的 NEI 体系和欧洲的 EMEP/CORINAIR 体系。Buron[20]建立了适用于加拿大的宏观路网机动车排放量化评价模型 CALMOB6,该模型将交通模型 EMME/2 同排放模型 MOBILE 相结合,通过对 MOBILE 模型输入参数进行修正,量化预测过去、当前及未来的路网机动车排放变化。在中观层面上,Tuia 等[21]采用 COPERT 模型预测智利 Gran Concepcion 市的路网机动车排放总量,并分别选取六种空间分配指标进行中观层次路网机动车排放分配,最终认为选取网络中主干路路网密度作为分配指标最为精确。在微观车辆排放研究方面,Panis 等[22]以车辆瞬态速度和瞬态加速度为自变量,以车辆瞬态排放率为因变量,通过回归函数的方法建立了 FITR (Flemish Institute for Technological Research) 模型,提高了对单一车辆碳排放量的预测精度。

2.1.3 城市低碳交通发展策略研究。

对现有交通管理与控制方式的优化是当前交通碳排放研究的重点, 基于碳排放的密度分布实施路网交通诱导及停车诱导, 通过对驾驶员行驶路径的合理诱导, 达到减少车辆加减速次数和拥堵现象, 减少碳排放量。Jonkers 等[19]认为停车诱导及信息系统和智能停车服务能从路径选择方面影响驾驶员, 引导驾驶员选择到达停车场的捷径, 间接减少车辆碳排放, 并利用仿真实验对其影响进行评估。Stevanovic 等[23]以燃油消耗及 CO₂ 排放最低为目标函数, 利用仿真软件 VISSIM、CMEM 及 VISGAOST 优化交叉口信号控制。研究结果显示, 将碳排放指标纳入信号控制优化模型能减少 1.5% 燃油消耗, 进而降低碳排放。Zegeye 等[24]提出在风力影响条件下排放物扩散模型, 并建立基于总行程时间、总碳排放和扩散等级为指标的 VSL (Variable Speed Limit) 控制策略, 旨在实现行程时间与排放物扩散的平衡。Boriboonsomsin 等[25]将微观交通仿真模型 PRAMICS 与基于瞬时工况的 CMEM 模型结合, 评价和比较了加州的两种合乘车专用车道 (High-occupancy vehicle lanes, HOV) 的减排效果。

2.2 国内研究

2.2.1 城市路网交通系统碳排放监测研究

公路隧道可被看作一个控制车辆尾气扩散的特殊设施, 其作用类似于利用定容采样法在实验室内进行检测。隧道测试法 (Tunnel Test) 基本原理将隧道看成一个理想圆柱状活塞, 在一定时间内活塞进出的污染物浓度差与通风量的乘积等于通过隧道的机动车污染物总排放量。因此, 通过检测经过隧道的车流排入隧道内的污染物浓度和隧道内风速等环境参数, 可推导出通过隧道整体车队的平均单车排放。该方法克服了台架测试只能测试单车, 无法反映车辆组合和路上行驶模式的局限性, 更真实地反映机动车在道路行驶情况, 而且包含了当地机动车构成、交通状况、气象条件的影响, 从而获得更加可靠的排放因子和源成分谱[26], 其检测得到的排放数据能够代表隧道内车流真实行驶状态下的整体污染物排放水平。付琳琳等[27]选取广州珠江隧道进行机动车挥发性有机物排放特征和排放因子的隧道实验, 得到真实道路交通状态下的城市机动车排放因子。研究选取有代表性的各类机动车进行台架实验, 并对隧道实验和台架实验的结果作初步对比分析, 隧道实验得到所得排放因子与机动车台架实验的结果基本吻合。但隧道实验不足之处在于其检测

方法较为复杂且对其它地区不具备广泛适用性。近年来,车载排放测试系统得到广泛应用[28]。车载测试技术代表了排放测试的发展方向,能基于道路实测收集逐秒排放和行驶数据,并通过设计合理的测试规范,有效提高数据收集精度和可重复性,也越来越受到众多专家学者的认可。秦孔建等[29]将机动车按排放技术类型分为五类,利用 OBS-2200 车载排放检测设备分别检测了混合工况下不同类型车辆的排放因子,并与定容取样测量系统检测结果进行对比。结果表明基于 OBS-2200 的车载排放测试系统对车辆气态排放物的测量与实验室定容取样测量设备之间具有较高相关性,可有效地用于车辆实际道路排放的测量评估。蒲一超[30]采用路域可移动式空气质量监测仪,实时实地采集空气污染物浓度与交通量,并进行相关性分析的方法,研究路侧空气污染物浓度的变化。研究选取上海市典型城市次干路真南路为监测地点,使用路域空气质量监测仪实地采集路侧空气污染物浓度,分析其浓度变化与机动车流量的相关性。谢涛等[31]提出基于无人机平台的环境应急监测系统框架。其中无人机在整个监测系统中主要起到按照指定航迹飞行,并提供任务载荷的工作平台的作用,可搭载基于二维面状航拍作业模式的光谱类设备和基于泵吸式点状采样监测模式的机载气体监测设备(如粒子探测仪、差分吸收光谱探测系统、电化学类气体监测设备等)。

2.2.2 城市交通碳排放分布模型及评估体系研究

近年来,国内学者开始关注交通特征对排放的影响,包括坡度、公交专用道设置方案、信号优化、限速等因素。Zhang 等[32]研究了道路限速方案对交通排放的影响,利用 OEM 设备获取车辆排放实测数据,结合 Vissim 进行仿真实验,获取了交通排放最低的优化限速方案。此外,国内学者对城市路网交通系统碳排放的评估也展开初步研究。石灵芝等[33]根据 2008 年长沙市火车站监测点全年大气 PM₁₀ 及气象参数的小时平均数据,采用人工神经网络,建立 BP 人工神经网络预测模型,预测 PM₁₀ 小时平均浓度,并从空间维度和时间维度预测交通排放的分布。研究结果表明,与多元线性回归模型相比,人工神经网络模型能捕捉污染物浓度与气象因素间的非线性影响规律,更好地预测 PM₁₀ 质量浓度。此外,徐伟嘉等[34]采用 CALINE4 大气扩散模型、计算流体力学(CFD)仿真模型等方法,通过对典型道路的实测和数据分析,研究了道路绿化带对街道峡谷内流场与机动车尾气扩散的影响特征,从而深入研究不同类型城市交通系统排放的扩散机理。近年来,越来越

多检测手段被运用于交通碳排放研究中, 最为常见方式包含定点监测和移动式监测, 其中移动式又可分为人工手持, 车载监测和气球监测等; 通常, 移动监测的载体设备具有监测范围广, 机动灵活, 数据量大等特点, 是未来发展的重要方向。北京交通大学莫飞等[35]运用车载尾气检测技术对尾气量化模型进行较细致的研究, 能在一定精度内预测某类型车辆的整体排放和运行模式变化对排放的影响。He 等[36]采用便携式空气检测设备对香港街道峡谷中机动车尾气排放进行监测, 但存在样本容量偏小的问题。通过上述载体和测量仪器, 学者们还针对对机动车排放及油耗进行组合预测, 分析不同道路交通特征改变对机动车排放的影响。

2.2.3 城市低碳交通发展策略研究

从宏观战略层面, 陆键[37]针对我国目前交通碳排放现状, 分析了适合我国城市的低碳交通发展战略和模式。苏城元等[38]基于我国燃烧热值的 CO_2 排放因子, 统计分析了城市交通 CO_2 排放现状, 并将其结合城市交通结构进行相应分析, 通过情景分析评估不同减排策略的减排效果, 为发展以公共交通为主导的交通模式、及节能减排的实施提供了理论依据。在具体策略上, 熊驰飞等[39]以四相位单交叉口为研究对象, 在保持信号周期不变的情况下, 以减少人的总延误和交叉口区域尾气排放量为目标, 通过改变各相位绿灯时间来建立优化模型, 运用粒子群算法对模型求解。仿真算例表明, 此方法在降低交叉口区域人总延误的同时, 减少了该区域内机动车尾气排放量, 在保障车辆正常通行的情况下改善了环境质量。Zhou 等[40]结合交通规划模型 TransCAD 和基于排放模型 MOBILE 构建的本地化排放模型 MOBILE-China, 建立了奥运前和奥运期间的网格化的机动车污染物排放清单, 评价北京奥运期间实施的临时交通控制管理对大气污染物减排的影响。

2.3 国内外研究述评

综合所述, 目前国内外对城市交通碳排放研究大都集中于通过数据采集, 研究机动车排放与扩散模式时空变化规律, 主要通过实测尾气排放数据并结合仿真进行分析。由于交通碳排放受天气、机动车、驾驶行为、路况等多种因素影响, 需收集各方面数据并进行综合分析, 才能准确揭示其形成、分布机理。现有研究多集中于通过数据采集, 研究城市交通碳排放的时空变化规律, 数据量较少且检测手段相对单一, 数据样本普遍较小且对气象条件、交通参数、城市路网等大规模数据的综

合分析较为少见,而且监测区域多集中于交叉口和特定路段,这些在一定程度上限制了交通碳排在较大空间范围内分布机理的研究。此外,现有机动车排放量化模型无法同实测交通特征数据有效衔接。目前,利用检测器只能收集到车辆的平均速度,而现有基于微观行驶参数开发的排放量化模型需输入逐秒行驶数据。而基于平均速度这一中观行驶参数开发的排放量化模型虽可以输入平均速度,但其内嵌的行驶周期无法反映我国的机动车实际行驶状况。并且这些模型大多为宏观模型,一般仅用于预测车辆在一定区域内的综合排放。如能整合现有数据监测手段,通过无人机、道路线圈、车载检测等设备获取海量“大”数据,将帮助研究人员在路网层面建立交通碳排放的分布模型,从而明确区域交通碳排放的根源与扩散原理。本课题拟基于大数据移动监测手段,研究交通碳排放的形成机理和分布模型,在此基础上建立城市交通碳排放评估体系,可为制定低碳交通发展策略,推广低碳交通时间提供理论指导与实践借鉴。

在低碳交通发展方面,目前国内外研究中较为广泛的低碳交通发展策略及实践方法主要包含:面向管理者的交通规划与管理,以及面向驾驶员的驾驶行为诱导和路径选择优化。相关研究分别介绍如下。

(1) 以低碳为导向的交通规划与管理。其核心是以减少碳排放为指标重新考察传统交通规划与管理方式,其中公交优先(Transit-Oriented Development)作为减少交通碳排放和缓解交通拥堵的有效方式,成为近年来研究的热点。BRT(Bus Rapid Transit)系统、慢行交通系统、城乡公交一体化等概念相继提出并应用到城市规划与建设中去,涌现了一批典范城市,如西班牙波哥大、新加坡、韩国首尔、巴西库里蒂巴~~错误!未找到引用源。~~等。在吸收借鉴国外公共交通发展宝贵经验的基础上,我国学者也进行了大量比较性研究,努力将公交优先理念在我国付诸实践,并已取得初步进展。除公交优先外,国外学者还开展一些拓展性的研究,如Stevanovic等~~错误!未找到引用源。~~的研究显示,将碳排放指标纳入信号控制优化模型能减少1.5%燃油消耗,Zhang等~~错误!未找到引用源。~~证明了存在拥堵收费方案使得一定交通流的碳排放最少,并给出碳排放减少量的边际值。Lee等[40]将微观交通模型TransModeler、MOVES模型与区域大气扩散模型CALPUFF,以及健康影响评价模型BenMAP结合,评价了美国加州的清洁货车计划(Clean Truck Program),

对区域污染物减排、空气质量改善和健康效益起到良好效果。

(2) 面向驾驶员的驾驶行为诱导和路径选择优化。该方向系近年来国外学者的研究热点,大量学者开展了众多卓有成效的研究。然而该领域研究在国内尚处于起步阶段,尚未开展广泛研究与讨论。

以低碳为导向的驾驶行为诱导方面,国外研究已逐渐由理论研究向实践应用发展。Saboochi 等^[0]提出在不同路况条件下,基于行驶速度与齿轮齿数比的行驶策略。Van der Voort 等^[0]开发了一种驾驶辅助系统,对比实际燃油消耗与内置算法,得到最低燃油消耗,提醒驾驶员调整驾驶行为。实验证明,辅助系统的简单提醒能够进一步降低 7%的燃油消耗。在此基础上,Wada 等^[0]提出适应不同驾驶行为的驾驶辅助系统,以获得更优的辅助效果。Van Mierlo 等^[0]通过实地测量与交通模拟,总结了绿色驾驶的相关建议。在研究基础上,佛兰德斯地区政府发起了名为“RoB”的宣传运动(Rustig op de Baan = cool or calm on the road),鼓励驾驶员采用更平和的驾驶行为。

以低碳为导向的路径选择优化,是交通运输、地理信息与计算机应用等多学科的有机融合。现阶段,其研究热点与难点普遍集中于不同路径碳排放的测算。大量学者采用不同数据源和不同碳排放模型,在多个地区开展估测,在研究所在区域获得了一定成果,具有重要意义,但尚未取得普适性结论。根据研究数据来源差异,可将已有研究分为两组,如表 1 所示。

第一组研究采用实际数据为研究对象,如 GPS 数据、PEMS(Portable Emission Measurement System)设备数据和交通数据库数据。Frey 等^[0]通过手持排放测量设备 PEMS(Portable Emissions Measurement System),测量了美国北卡罗莱纳州 2 个 O/D 对间不同路径碳排放,并分析其关键影响因素。Bandeira 等^[0]选取美国弗吉尼亚州和葡萄牙奥波托及阿维罗区域的城市道路,通过 GPS 数据与视频信息的采集,确定碳排放最少路径在交通高峰和平峰时段的普适性。Minett 等^[0]借助 ADAS-RP 导航系统数据库与 GPS 信息,考察车辆速度对碳排放的影响。Kang 等^[0]利用北京动态交通信息服务系统,总结了六种典型驾驶模式并确定不同模式下的碳排放值。Ahn 等^[0]利用 GPS 信息,研究了道路类型对于碳排放的影响。其研究表明,选择行驶速度更高的路径不利于降低排放量,在路径选择中适当选取一定比例的

低速路段，并减少激进的驾驶行为有利于节能减排。

表 2-1 以低碳为导向的路径选择优化相关研究

文献	地点	数据来源	研究因素	排放模型
Frey et al. (2007)	美国	PEMS	车辆类型，交通延误，道路坡度	VSP
Bandeira et al. (2012)	美国，葡萄牙	GPS 和视频采集	高峰/平峰	VSP
Minett et al. (2011)	荷兰	GPS 和 ADAS-RP 导航	车速	VT-CPFEM-1
Kang et al. (2011)	北京	北京动态交通信息服务系统	驾驶模式	IVE
Ahn et al. (2008)	美国	GPS	道路类型	Moble 6, CHEM, VT-Micro
黎明等 (2013)	北京	VISSIM 仿真	交通网络，车速，驾驶模式	MOVES
Richter, et al. (2012)	N/A	ULTranSim 仿真	车辆类型	N/A

第二组研究以虚拟数据为研究对象。黎明等[50]研究显示，传统标定方式下 VISSIM 仿真软件无法满足碳排放测算要求，因此，研究多采用交通仿真软件进行基础数据获取，并与碳排放模型相结合。Richter 等⁰使用电子仿真软件，模拟电动车、汽油车与混合动力车的运行，并考察不同车辆类型对碳排放的影响。在上述研究基础上，Boriboonsomsin 等⁰根据道路路网数据库与碳排放影响因素表，自主开发出一个导航软件，将理论研究推广到实践层面。

可以看出，现阶段国内外减少交通碳排放的研究差异较大。国外面向管理者的交通管理与规划研究已较为成熟，其成功经验也为国内学者广泛参考。然而，国内面向驾驶员的驾驶行为诱导与路径选择优化尚处于起步阶段，仍有较广阔的研究空间。

第三章 碳排放移动监测实验方案设计

为获取交通碳排放及扩散数据,本研究在碳排放移动监测基础上充分利用现有数据实测手段,选取最佳交通、碳排放数据检测技术及实验设备,针对研究目标提出采集原始数据的监测实验方案。

3.1 碳排放移动监测区域及设备选型

通过移动监测设备采集大样本交通碳排放检测数据,更准确地获取我国城市路网行驶环境下不同工况机动车的排放因子及污染物扩散的时空变化情况,标定机动车排放模型及扩散模型。因此,通过大规模检测获得第一手排放数据,将提高排放因子和模型精度,避免简单借用国外模型而产生的结果偏差。

3.1.1 监测对象

本研究主要监测城市主干道、次干道等城市道路以及国道、省道等公路的交通状况及机动车 CO、CO₂、HC、C 排放情况,获取城市路网的交通流数据及主要机动车的运行特征和实时排放数据、交通排放扩散数据、气象因素数据及碳排放空中扩散数据。具体包括:

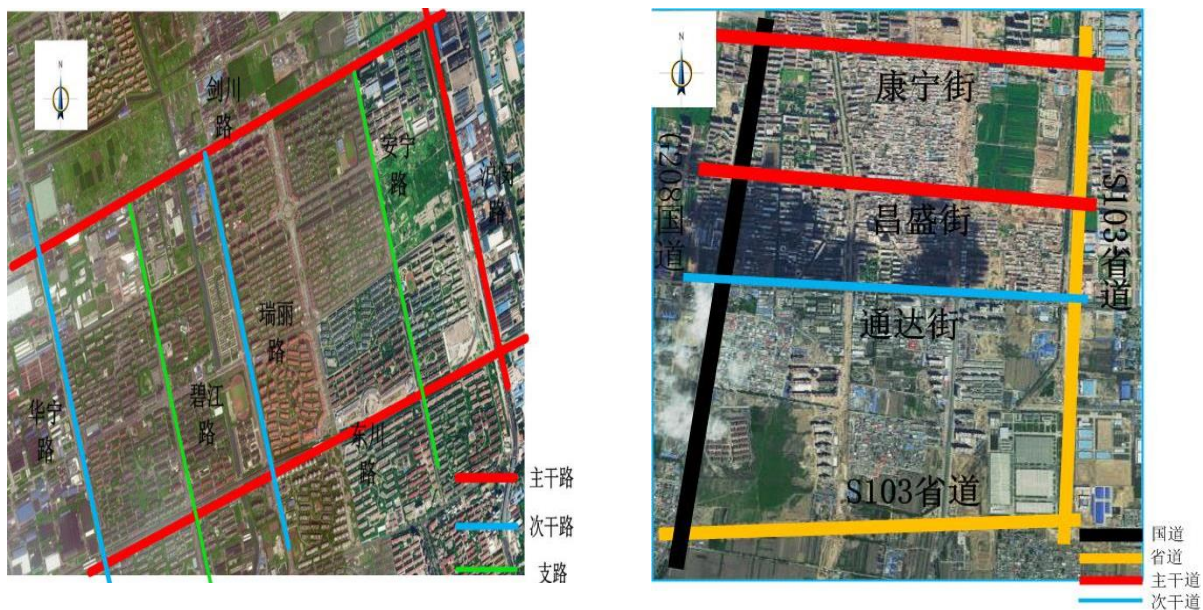
- (1) **道路特征数据:** 道路等级、车道数、监测路段长度、交叉口渠化、信号灯配时;
- (2) **交通流特征数据:** 交通量、机动车平均速度、车型比例、交叉口机动车转向比例;
- (3) **机动车排放数据:** 城市道路主要类型机动车瞬时 CO、CO₂、HC、C 排放量;
- (4) **机动车行驶特征数据:** 机动车瞬时速度、瞬时加速度、瞬时发动机转速;
- (5) **碳排放扩散数据:** 碳排放在道路两侧及交叉口外沿的浓度分布、碳排放在垂直高度的浓度分布、行人碳暴露浓度;
- (6) **气象及环境参数:** 温度、湿度、太阳辐射强度、风向、风速。

3.1.2 监测区域

本研究**实际道路车载排放测试**选用基于固定路线的循环测试法。该方法一方面方便可行,测试时间容易控制;另一方面循环测试有利于不同数据间的精度对比和错误数据的原因分析。为了使所收集行驶和排放数据能够充分反映车辆的实际行驶和排放状况,需要根据区域路网和交通特征设计合理的排放测试路线。研究在综合考虑道路等级、交通量大小、交通拥堵程度以及交通流时变特征等基础上,以上海市、太原市两地相似居住用地为靶区(主干道、交叉口及居住用地等),设计了两条包括城市中各等级道路的环形测试路线。每条路线中各等级道路的长度比例均来自车辆各类道路上的实际行驶里程比。具体监测路网如下:

上海市: 位于闵行区的沪闵路-东川路-华宁路-剑川路区域,其中东西向道路包括剑川路(2.5km)和东川路(2.5km),南北向道路包括沪闵路(1.3km)、安宁路(1.3km)、瑞丽路(1.3km)、碧江路(1.3km)和华宁路(1.3km)。该测试区域路段全长 11.5km。该区域中央为居民区,东、西两侧分别毗邻吴泾工业园、闵行开发区等工业集中区,路网中重型车比例较高,高峰时段交通较为拥堵,路网交通碳排放量较大,容易对居民区环境造成较大影响。

太原市: 位于小店区康宁街-S103 省道-G208 国道区域,其中东西向道路包括康宁街(2km)、昌盛街(2.1km)、通达街(2.2km)和 S103 省道东西段(2.4km),南北向道路包括 G208 国道(3km)和 S103 省道南北段(2.6km)。该测试区域路段全长 14.3km。该区域主要为居民区,除此之外还有小店区政府、卫生局等政府机构。该区域东部为太原高新技术产业开发区及太原经济技术开发区两个国家级开发区,同样具有重车比较高、交通流量大的特点。测试区域路网如图 3-1 所示:



(a) 上海市监测路网

(b) 太原市监测路网

图 3-1 碳排放实验监测区域

实验所选取监测区域为典型城市街区，以居住用地为主。区域内均有远离道路及交叉口的空地，便于设置移动气象监测设备测量气象参数(温度、湿度、风向等)及碳排放背景浓度。区域内道路无坡度，路况较好且车流量大。过往机动车车型组成系我国典型大城市交通主干道机动车，具有较好代表性。

此外，为监测高速公路的交通碳排放，研究还选取无锡市通锡高速顾山段进行碳排放及机动车行驶特性监测。



图 3-2 无锡市通锡高速

3.1.3 监测设备及载运工具

区别于传统定点监测方案, 本课题主要利用多种载运工具搭载排放移动监测设备实现对交通碳排放的移动监测。其中移动监测设备碳排放监测设备主要包括: 车载排放检测设备 OBEAS-3000、SidePak 个人粉尘仪、气溶胶检测仪、手持式 CO₂ 监测仪、雷达测速仪、数码摄像机、便携式微型空气质量检测系统等。主要监测设备具体参数如表 3-1 所示。

表 3-1 实验监测设备参数

设备名称	型号	用途	具体参数
车载排放检测设备	OBEAS-3000	机动车碳排放及行驶特征参数监测	排放模块: ELD 排放专用分析仪、柴油烟度颗粒分析仪; 运行参数模块: OBD II 诊断仪; 分析模块: 主控 PC; 传感器: NDIR 红外线传感器、电化学传感器。
SidePak 个人粉尘仪	TSI8532	行人碳排放颗粒物暴露浓度监测	传感器类型: 90°光散射; 量程: 0.001-150mg/m ³ ; 分辨率: ±0.1% 读数, 0.001mg/m ³ ; 监测内容: PM1、PM2.5、PM4、PM10 粉尘浓度。
SidePak 粉尘仪/气溶胶检测仪	TSI8534/AW510	多种粒径碳排放颗粒物及 CO 扩散监测	传感器类型: 电化学传感器; 采样探头: Leland 采样泵, 撞击式采样头; 分辨率: ±0.1% 读数; 流量范围: 10L/min
PM 2.5 颗粒物采样系统	DPS	多种粒径碳排放颗粒物及 HC 浓度监测	传感器类型: NDIR 红外线传感器; 采样方式: 泵吸式; 量程: 0-2000ppm; 分辨率: 0.1ppm
手持 CO ₂ 检测仪	HD-P900	路侧 CO ₂ 扩散及行人暴露浓度监测	传感器类型: NDIR 红外线传感器; 采样方式: 泵吸式; 量程: 0-2000ppm; 分辨率: 0.1ppm
CO 检测器	The Langan Model T15n	路侧 CO 扩散及行人暴露浓度监测	传感器类型: NDIR 红外线传感器; 采样方式: 泵吸式; 量程: 0-2000ppm; 分辨率: 0.1ppm
手持雷达测速仪	Bushnell10-1921	车速监测	测速范围:0.1-321km/h; 测试距离: 0-456m; 精度±1km/h。
Libelium 便携式微型空气质量检测系统	Waspmote Gas Sensors Kit	平面及垂直高度碳排放浓度监测	传感器模块: 温度传感器、湿度传感器、CO 传感器、CO ₂ 传感器。

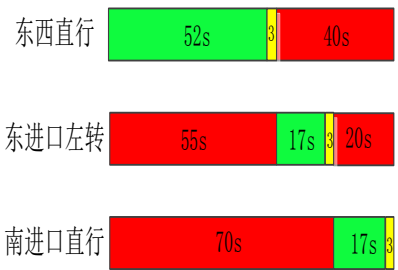
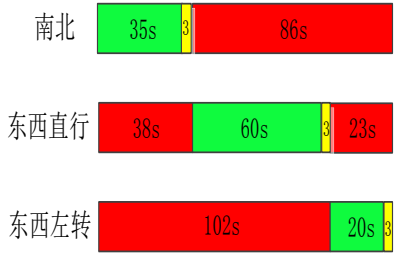
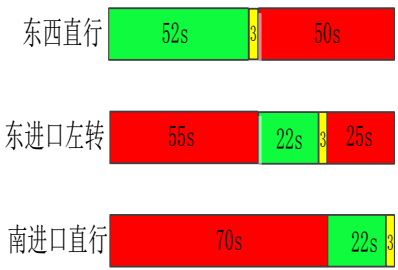
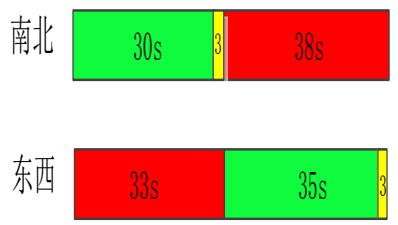


<p>东西直行 </p> <p>周期95s</p> <p>(a) SidePak 个人粉尘仪 (TSI 8532)</p>	<p>南北 </p> <p>周期124s</p> <p>(b) 粉尘仪/气溶胶检测仪 (TSI 8534)</p>
<p>东西直行 </p> <p>周期105s</p> <p>(c) 粉尘仪/气溶胶检测仪 (AW510)</p>	<p>南北 </p> <p>周期71s</p> <p>(d) PM 2.5 颗粒物采样系统 (DPS)</p>
<p></p> <p>(e) 手持雷达测速仪 (Bushnell10-1921)</p>	<p></p> <p>(f) 手持 CO₂ 检测仪 (HD-P900)</p>



图 3-3 碳排放移动监测设备

为了采集机动车的行驶特征参数和尾气排放数据，载运工具选取道路上常见的轻型和重型机动车，同时为实现对交通碳排放的多维度监测，本研究还选取固定翼无人机作为便携式微型空气质量检测系统的载运工具，对垂直高度的污染物浓度进行监测。载运工具参数如表 3-2 所示。

表 3-2 载运工具参数

载运工具型号	类型	性能参数	搭载设备
雪铁龙 DC7140	轻型车	车重: 927kg; 燃油类型: 汽油; 排量: 1.4L。	OBEAS-3000
大众 7160CIX	轻型车	车重: 1080kg; 燃油类型: 汽油; 排量: 1.6L。	OBEAS-3000
厦门金龙 XML6120E5	重型车	车重: 11350kg; 燃油类型: 柴油; 排量: 7.8L。	OBEAS-3000
丹东黄海 DD611ZHZA	重型车	车重: 10900kg; 燃油类型: 柴油; 排量 7.8L	OBEAS-3000
MD4-1000	固定翼无人机	翼展: 4.3 m; 机长: 2.85 m; 机高: 0.9 m, 翼面积: 2.36 m ² ; 自重: 12 kg ; 有效负荷: 30 kg; 巡航速度: 100-120 km/h; 飞行时长: 6 小时; 有效载荷舱容积: 81L。	Waspnote Gas Sensors Kit

3.2 多维度碳排放大数据移动监测方法

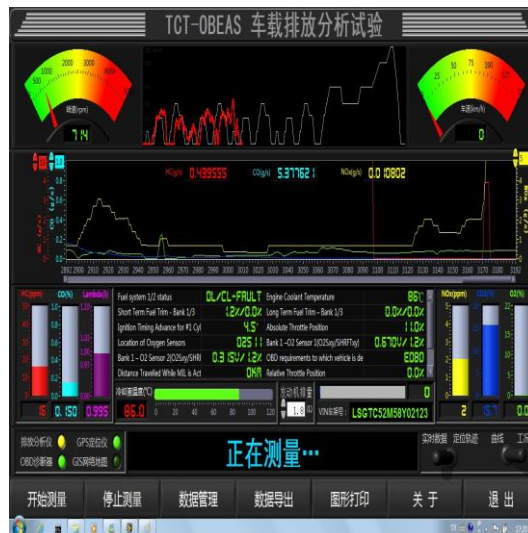
3.2.1 机动车运行数据及排放因子检测

近年来, 车载排放测试系统 (Portable Emission Measurement System, PEMS) 得到广泛应用[29]。车载排放测量技术主要通过 PEMS 对车辆尾气进行直采, 将排气尾管直接连接到车载气体污染物和颗粒物测量装置, 实时测量整车排放的体积浓度和排气流量, 从而获得气体污染物质量排放量和颗粒物排放量。通过对所获得瞬时排放数据及 GPS 数据进行处理的结果, 形成对被测车辆排放水平的评估。该技术的应用不仅可保证测试的精确度和可靠性, 而且节约大量测试时间和测试成本。特别是系统具有重量轻、体积小特点, 能放在各种被测车辆上进行实际道路排放实时测量, 从而反映出各种车辆实际道路排放特征。研究中机动车排放因子数据将通过 OBEAS-3000 车载排放测试系统收集 (图 2)。OBEAS-3000 是一种集成化、高精度车载排放分析系统, 集高精度排放分析仪、高精度颗粒烟度测试仪、车辆参数 OBD 诊断仪、全球卫星定位系统 GPS 于一体, 适合于车载实际道路行驶工况下的汽车排放测试。OBEAS-3000 车载排放分析系统可对行驶车辆的 CO、

CO₂、HC、NO_x、PM 颗粒浓度、车速、加速度等参数进行实时检测。在中观交通碳排放研究中，搭载该设备的试验车沿监测区路网指定线路行驶。选择道路上常见小型车、中型车及大型车作为试验车，分别进行试验，获得不同车型的排放因子(表 3-1)。最后，利用发动机台架试验(图 3-3)模拟与移动检测试验相同的发动机工况获取相应的排放因子[1]，通过对比实验验证移动检测的准确性。



(a) OBEAS-3000 车载排放检测



(b) 车载排放检测界面

图 3-4 OBEAS-3000 车载排放测试系统



图 3-5 发动机台架试验

表 3-1 主要车型排放因子

代表车型	单车碳排放因子 (g/km·veh)			
	CO	CO ₂	HC	C
小型车	待定	203	待定	待定
中型车	待定	1080	待定	待定
大型车	待定	3070	待定	待定

利用现代交通系统综合监测和拍摄系统（图 3-4），对包括公路在内交通基础设施的交通状况和场景进行实时观测和录像拍摄，利用其交通数据分析系统和图像处理系统获得课题研究需要的路网静态交通设施特征数据及动态交通运行特征数据。实验人员利用摄像机拍摄实验路段交通流，并利用手持雷达测速仪监测车辆行驶速度，获取路段的交通量、车型构成及平均车速等参数。对于路网中的信号交叉口，实验人员将采集交通信号配时、交叉口渠化及各方向进口道的交通量等信息。

碳排放及交通数据采集实验在上海、太原两地的实验路网采用车载排放检测设备 OBEAS-3000 收集具有代表性的各主要机动车类型的实时碳排放及行驶特征数据，同时在试验路段采集道路交通量、车速等相关交通流数据。并通过走访调研相关部门获取城市各类型机动车保有量、交通运输客货运周转量、机动车年平均行驶里程等数据。在无锡市指定高速路段基于小型汽油车进行排放检测实验，利用 OBEAS-3000 采集机动车逐秒碳排放及行驶参数。



图 3-6 交通系统综合监测和拍摄系统

3.2.2 基于路侧检测设备的碳排放扩散监测

数据将通过路边排放检测设备 SidePak 个人粉尘仪, 粉尘仪/气溶胶检测仪和 DPSPM2.5 颗粒物采样系统等设备采集。首先, 在远离道路及交叉口 (>200m) 的空旷地带设置移动气象站及粉尘仪[4], 测定碳排放的背景浓度及监测区域的气象参数 (温度、湿度、风速等)。

在路侧设置粉尘仪/气溶胶检测仪和颗粒物采样仪, 监测污染物浓度变化与交通流的相关性, 同时为碳排放分布模型建立提供现场实测数据。路侧数据采集点具体位置如图 3-7, 主要选择远离道路交叉口的 3 个点进行监测。在空气质量监测仪采集数据的同时记录单向交通量。参考文献[30, 53]发现对向交通流对路侧空气污染物浓度的影响不大, 因此, 本研究只分析靠近路侧一向的交通量和路侧空气污染物浓度的变化关系。同时日照对空气污染物浓度影响并不显著[54], 因此, 本研究只选取天气条件 (即温度、湿度、风速) 相似的情况进行实地数据采集。同时, 为研究交通碳排在平面扩散情况以及与行人暴露浓度的关系, 课题中通过实验人员手持 SidePak 个人粉尘仪, 在垂直于道路方向的 5m、10m、15m 处监测道路两侧碳排放扩散情况, 每个点监测时间设为 15 分钟。

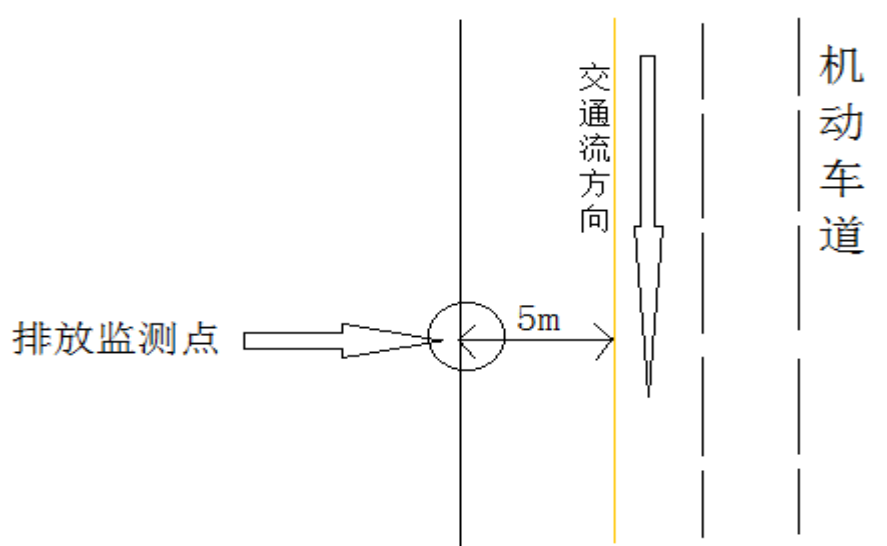


图 3-7 路侧数据采集点示意图

在道路交叉口设置交叉口四个拐角作为监测点, 设置粉尘仪/气溶胶检测仪和颗粒物采样仪, 监测交叉口碳排放浓度的变化规律[55]。同时, 利用摄像机记录

交叉口交通量及车辆排队情况, 研究车辆排队时间与碳排放浓度变化的关系。采样时间间隔分别以红绿灯周期、小时、天为单位, 探寻不同时间尺度上的碳排放浓度变化规律。

交通排放扩散及气象因素数据监测时间选取 15:00—18:00, 包含平峰(15:00—16:30)及高峰(16:30—18:00)时段, 持续监测两周时间。

第四章 城市道路机动车辆排放实验

本章基于第三章提出的移动碳排放监测方案，结合现有数据实测手段和交通及排放检测技术，按合理数据收集规范对交通流数据、机动车行驶数据及碳排放数据进行采集。除了进行交通碳排放监测实验外，研究还从上海市统计局、上海市交通委员会等部门获取相应道路等级、机动车保有量等相关数据，为交通碳排放研究提供数据支持。

4.1 道路及交通流数据采集

道路及通流数据是保证研究实施的关键。其中道路数据包括道路等级、车道数及实验路段长度，同时为建立相应的路网碳排放仿真模型，还需要调查路网内交叉口的信号配时和机动车的转向比例。交通流数据包括路段交通量、速度和车型构成三类，其中速度用于量化机动车排放，交通流量和车型构成则与机动车排放相结合用于量化评价路段排放情况。本研究主要利用交通系统综合监测和拍摄系统、手持数码摄像机拍摄路段交通流，从而获取该路段的交通量及重车比，并采集实验路段上存在的交通设施。同时利用手持雷达测速器采集该路段机动车行驶速度。道路断面信息如道路等级、车道数等和交叉口信号配时则主要从交通部门及现场实际观测获得。本研究于 2016 年 10 月 15 日于上海，2016 年 11 月 5 日于太原分别进行了道路与交通流数据采集实验。上海市及太原市监测路网的道路断面信息如表 4-1、4-2 所示。

表 4-1 上海市监测路网断面信息

序号	道路名	路段长度 (km)	道路等级	车道数
1	东川路	2.5	主干路	双向四车道
2	剑川路	2.5	主干路	双向四车道
3	华宁路	1.3	次干路	双向二车道
4	沪闵路	1.3	主干路	双向四车道
5	碧江路	1.3	支路	双向四车道
6	瑞丽路	1.3	支路	双向二车道
7	安宁路	1.3	支路	双向二车道

表 4-2 太原市监测路网道路段断面信息

序号	道路名	路段长度 (km)	道路等级	车道数
1	康宁街	2	主干路	双向六车道
2	昌盛街	2.1	主干路	双向八车道
3	通达街	2.2	次干路	双向四车道
4	S103 省道东西段	2.4	省道	双向四车道
5	G208 国道	3	国道	双向四车道
6	S103 省道南北段	2.6	省道	双向四车道

本研究中，交通量为该路段某一方向所有车道在一小时内通过监测断面的车辆数。重车比指黄牌车辆在道路中所占比例。车速则记录该路段上机动车速度的最大值及平均值。上海、太原两地监测路网的交通流数据本别如表 4-3、表 4-4 所示。

表 4-3 上海市监测路网交通流数据

道路名	交通量 (veh/h)	最小车速 (km/h)	最大车速 (km/h)	平均车速 (km/h)	重车比 (%)
东川路	1225	7.2	46.4	20.3	7
剑川路	1034	6.7	45.1	19.6	14
华宁路	551	8.4	56.0	34.2	2
沪闵路	1274	8.1	47.3	23.6	9
碧江路	365	10.2	54.4	35.5	1
瑞丽路	505	9.6	61.7	33.8	1
安宁路	227	7.3	56.5	37.1	1

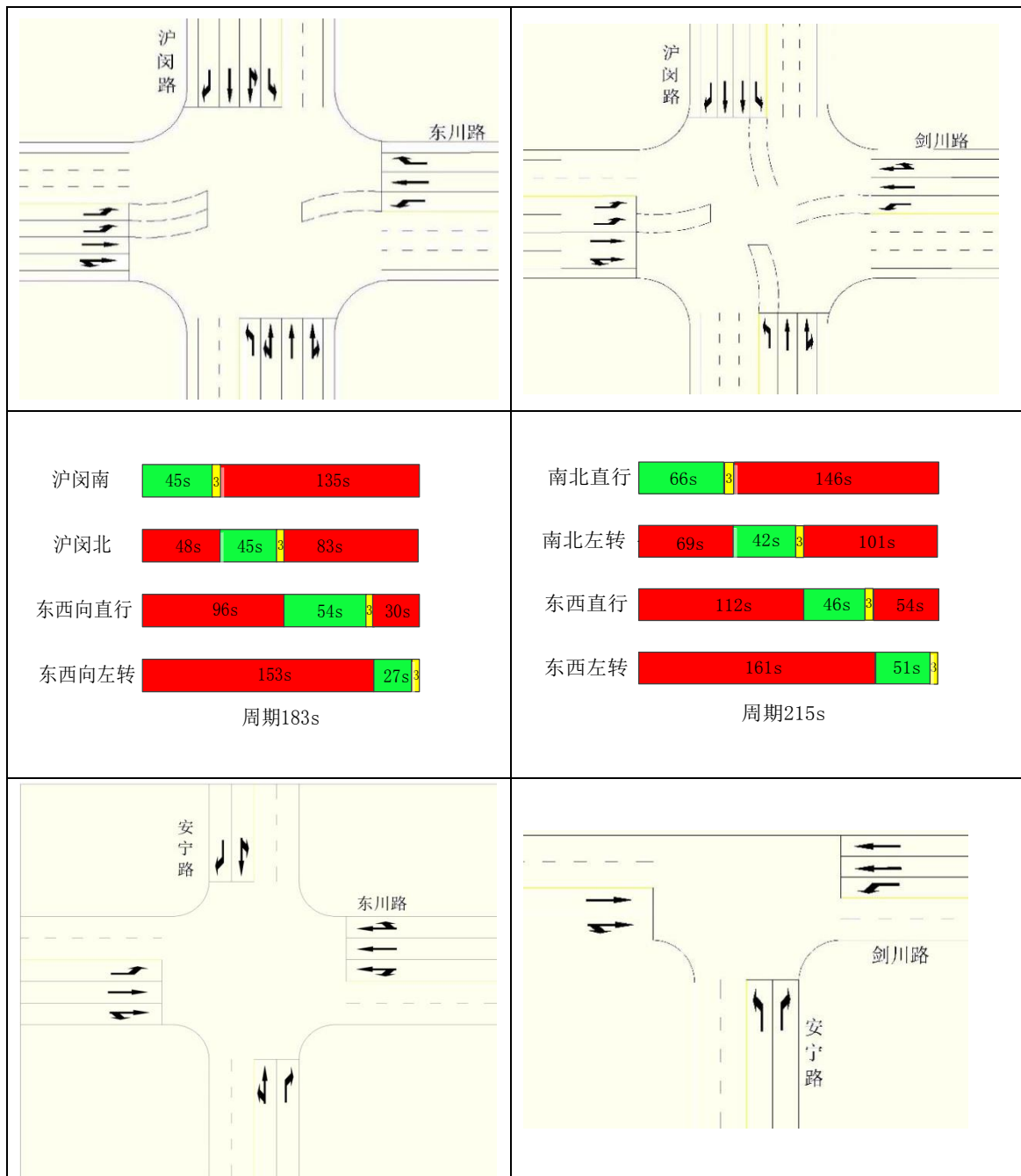
表 4-4 太原市监测路网交通流数据

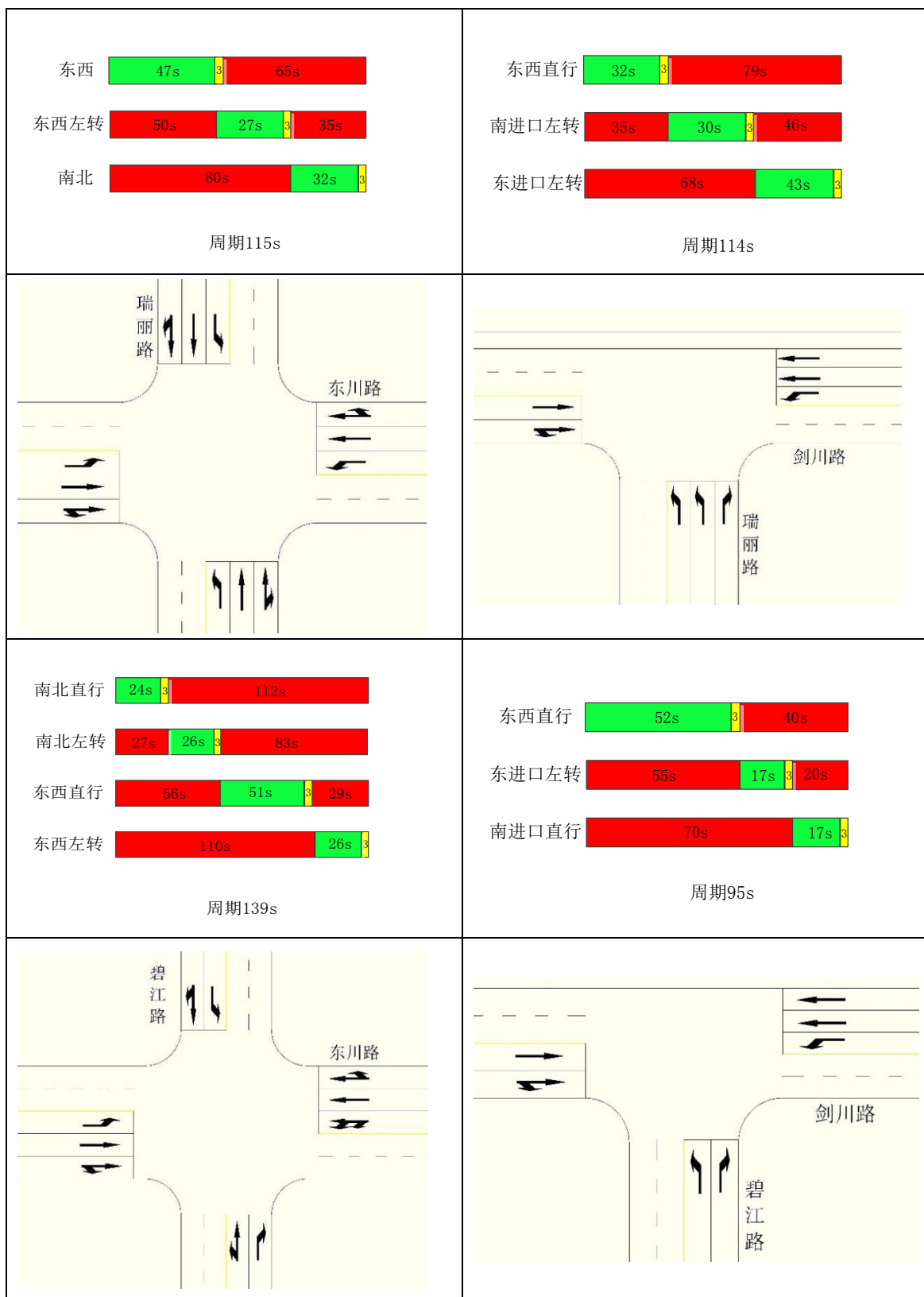
道路名	交通量 (veh/h)	最小车速 (km/h)	最大车速 (km/h)	平均车速 (km/h)	重车比 (%)
康宁街	952	9.4	70.8	41.4	8
昌盛街	1062	8.8	75	34.3	5
通达街	839	8.7	84.9	34.5	5
S103 省道东 西段	1145	15.9	64.4	44.5	12
G208 国道	1031	8.3	72.5	39.6	10
S103 省道南 北段	977	8.6	75	36.3	9

为建立碳排放监测区域的交通仿真模型，本研究以上海市的监测路网为样本，

采集了路网中各交叉口的信号配时参数、交叉口渠化参数及交叉口车辆转向比例, 如表 4-5、4-6 所示。

表 4-5 上海市监测路网交叉口渠化及信号配时信息





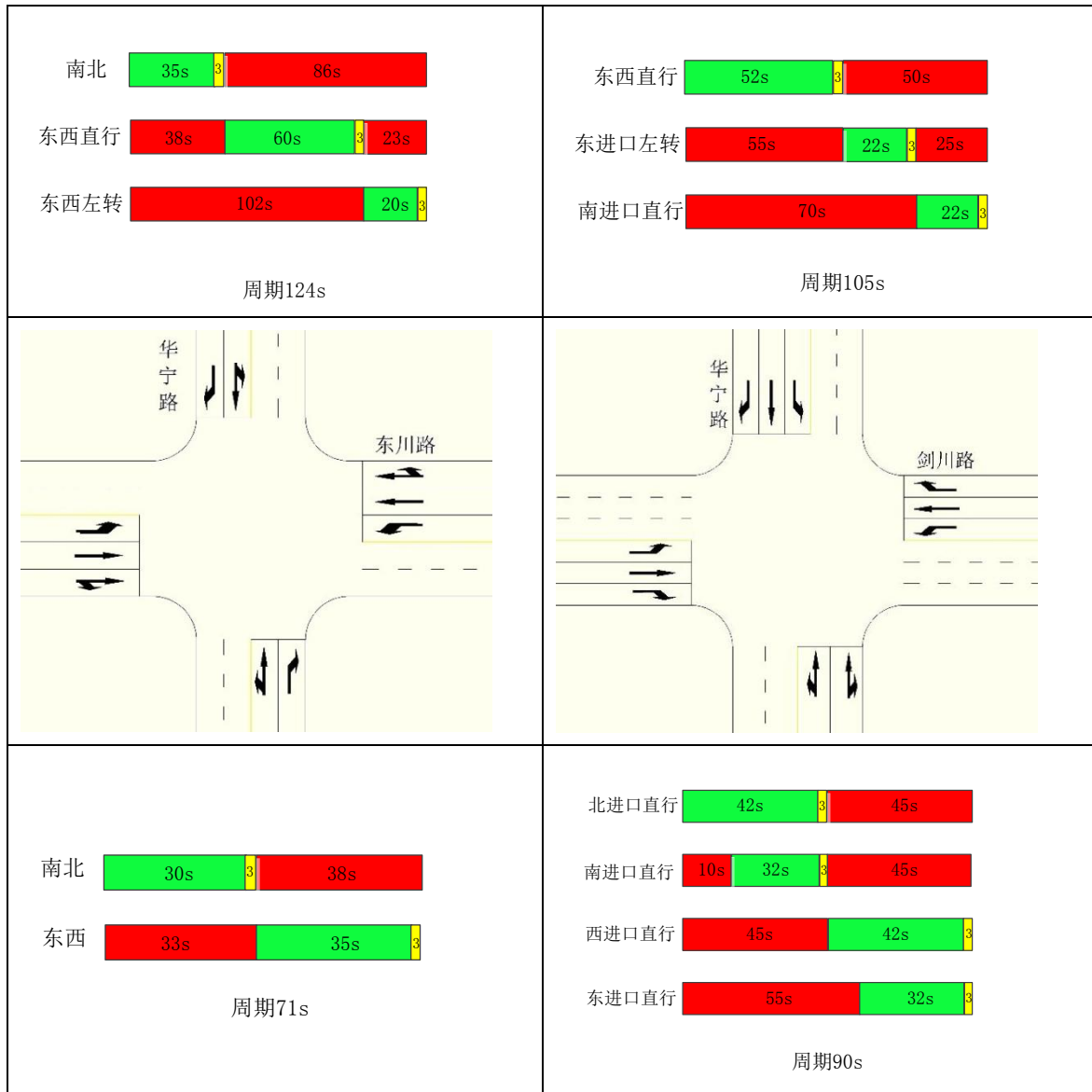
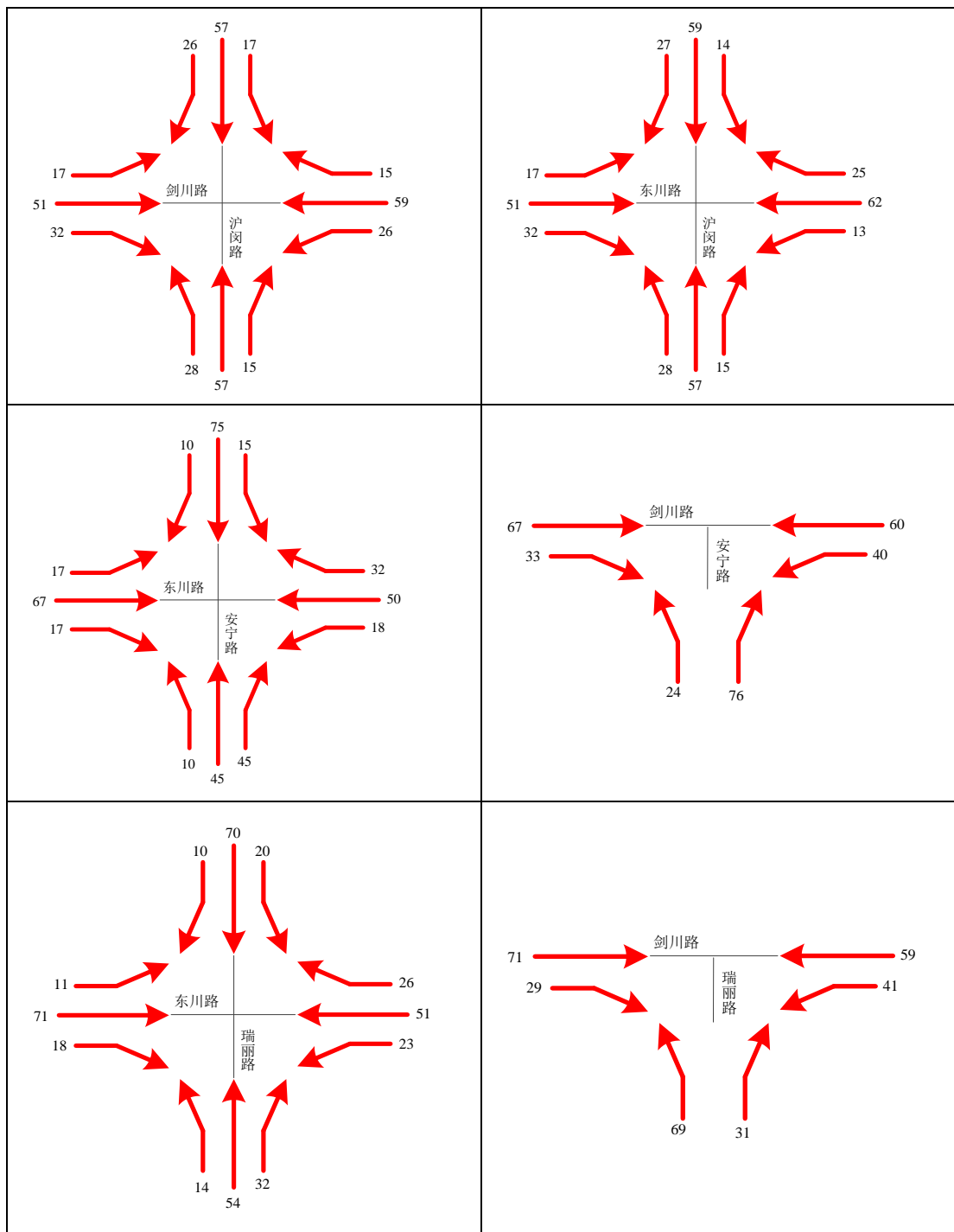
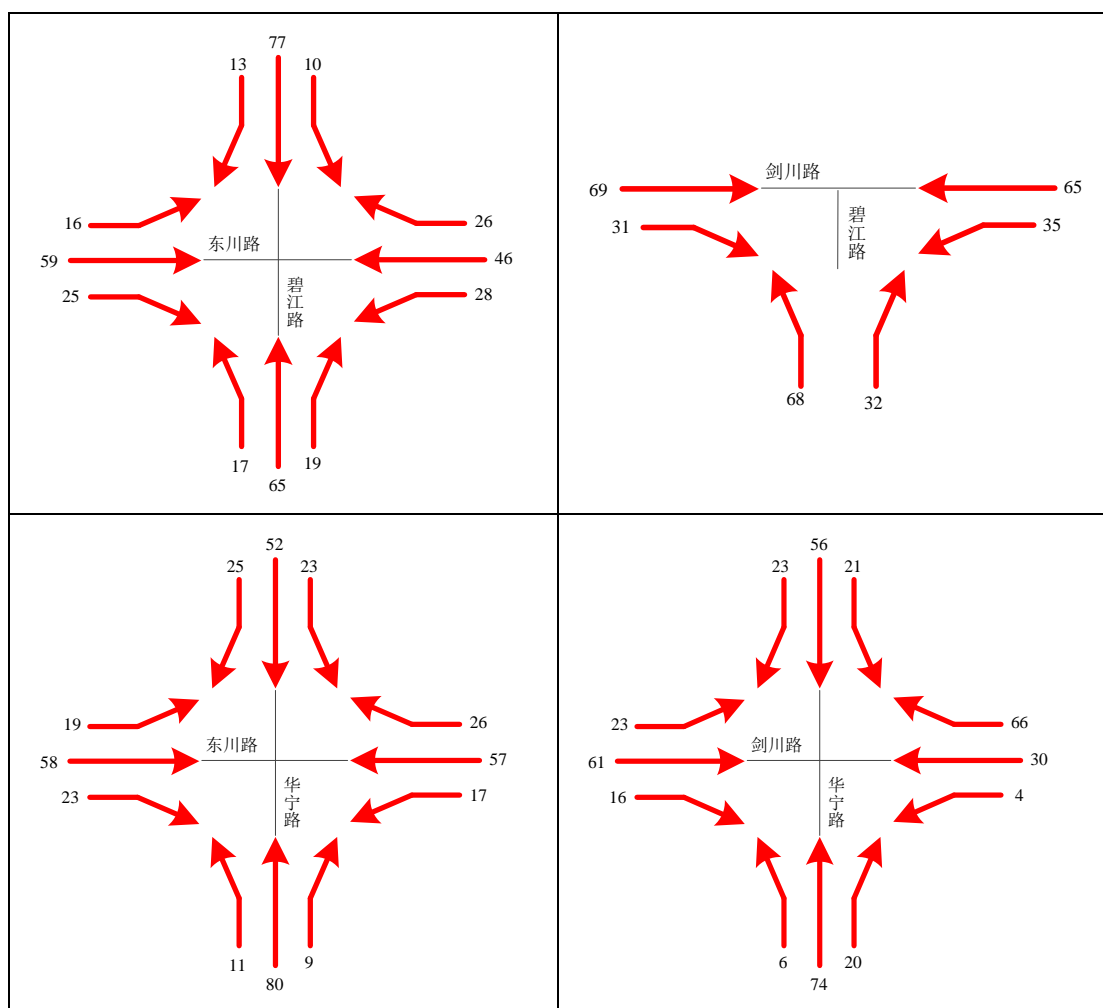


表 4-6 上海市监测路网交叉口机动车转向比例





4.2 机动车行驶特征及碳排放数据采集

本研究中机动车的行驶特征参数及碳排放参数均由车载移动排放监测设备 OBEAS-3000 采集。其中行驶特征参数包括车辆瞬时速度、瞬时加速度、发动机转速。碳排放参数包括 CO₂ 排放量、CO 排放量、HC 排放量及 C 颗粒排放量。将 OBEAS-3000 连接至机动车和主控 PC (笔记本电脑), 驾驶机动车在研究范围和时段内反复运行 (图 4-1)。主控 PC 将记录机动车运行全程的 CO、HC、CO₂ 等排放数据, 以及机动车的瞬时速度、加速度等数据。试验中分别选取道路中常见的轻型汽油车 (LightDutyGasolinevehicle, LDGV) 和重型柴油车 (Heavy DutyDieselvehicle, HDDV) 各两辆, 沿监测路网循环行驶 2 圈, 采集相应排放及行驶数据。所采集数据字段示例如表 4-7 所示。



图 4-1 OBEAS-3000 数据采集过程

表 4-7 OBEAS-3000 采集行驶特征及碳排放数据字段示例

日期	时间	速度 km/h	加速度 m/s ²	转速 r/min	CO ₂ 排 放 g/s	CO 排放 g/s	HC 排放 g/s	C 排放 g/s
2016-10-25	10:42:57	32.7	0.9	2521	0.58	0.0376	0.0015	0
2016-10-25	10:42:58	33.2	1.3	1187	0.92	0.0099	0.0014	0
2016-10-25	10:42:59	33.4	0.3	1235	0.71	0.0083	0.0013	0
...

研究在上海、太原两地共进行了 4 次实测实验（图 4-2）。监测路线为第三章图 3-1 所示路线。研究于 2016 年 10 月 15 日 10:30-11:30, 15:30-16:30 在上海市, 2016 年 11 月 5 日 10:00-11:00, 15:30-16:30 在太原市利用 OBEAS-3000 系统及实验车辆分别进行了四次道路排放监测实验。由于 OBEAS-3000 系统具有较高取样精度, 每 0.1s 进行一次取样。在数据记录时数据以 1s 为单位, 即每 10 次数据做一次平均处理, 共获得 LDGV 数据 7268 条, HDDV 数据 7220 条, 共计数据 14488 条。同时还利用 OBEAS-3000 排放监测设备, 以 LDGV 为实验车于 2016 年 11 月 25 日 13:00-17:00 在无锡市通锡高速顾山段进行两次实验, 采集机动车行驶特征数据及碳排放数据共计 3519 条。



图 4-2 采集人员在机动车碳排放数据采集现场

第五章 基于大数据移动监测的城市交通碳排放

形成机理研究

城市道路机动车碳排放形成机理研究按照时空分辨率可分为宏观（城市区域）、中观（道路及路网）和微观（单车逐秒）。本章将对城市道路碳排放源进行分类，分析机动车行驶时的碳排放过程，并分别从机动车燃油消耗、机动车行驶工况分布及驾驶员驾驶行为三方面研究城市交通碳排放形成机理。

5.1 机动车碳排放形成机理研究

5.1.1 道路排放源分类分级体系确定

在研究道路机动车排放形成机理时，应首先对城市区域内排放源进行初步摸底调查，明确当地机动车主要构成。由于实际使用车辆组成中包含不同车型、车种，且配置不同的排放控制措施，即使同类车辆也可能采用不同发动机结构、变速器类型及油喷射系统。由于车主不同，又使得车辆拥有不同维修保养状况、不同行驶里程等。另外，由于各地方执行的 I/M（Inspection/Maintenance）制度不同、车辆使用频率和使用方式不同以及各类型车辆所占比例不同，也会对实际运行整体车队碳排放造成影响。

为研究碳排放形成机理，本课题参照《道路机动车排放清单编制技术指南》[56]对排放源进行分级分类。道路移动源第一级分类将载客和载货车辆根据载客量和载货量分为微型、小型（轻型）、中型和大型（重型），公交车、出租车和摩托车单列；第二级分类根据车辆使用的主要燃料类型分为汽油、柴油和其他燃料，其它燃料类型主要包括液化天然气、压缩天然气等；在第二级分类的基础上，第三级根据车辆的污染控制水平分为国 0、国 1、国 2、国 3、国 4 和国 5，主要根据机动车注册登记年代判定，具体分类如表 5-1 所示，表中数据为标准开始实施的日期。机动车的类型、保有量、注册年代等数据从当地交管部门获得。采用简化的机动车分类方法，机动车按照车重和燃油类型主要可分为轻型汽油车（Light Duty Gasoline vehicle, LDGV）、轻型柴（Light Duty Diesel Vehiele, LDDV）、中型汽油车（Middle Duty Gasoline Vehicle, MDGV）、中型柴油车（Middle Duty Diesel Vehicle, MDDV）、重型汽油车（Heavy Duty Gasoline vehicle,

HDGV) 和重型柴油车 (Heavy Duty Diesel vehicle, HDDV) 六大类。

表 5-1 道路机动车三级分类体系

第一级	第二级	第三级					
		国 0	国 1	国 2	国 3	国 4	国 5
微型载客车	汽油						2018.1~
小型载客车	汽油						(北京
	柴油 其它	~2000.7	2000.7~	2005.7~	2008.7~	2011.7~	2013.2~ 上海
出租车	汽油						2014.5~
	其它)
中型载客车	汽油						
	柴油						
	其它						
大型载客车	汽油						
	柴油 其它	~2003.7	2003.7~	2004.9~	2010.7~	2013.7~	
公交车	汽油						
	柴油						
	其它						
微型载货车	汽油						
轻型载货车	汽油	~2000.7	2000.7~	2005.7~	2008.7~	2015.1~	2018.1~
	柴油						
中型载货车	汽油						
	柴油	~2001.9	2001.9~	2004.9~	2010.7~	2013.7~	
重型载货车	汽油						
	柴油						
摩托车	汽油	~2003.7	2003.7~	2005.1~	2010.7~		

5.1.2 道路移动排放源排放过程

机动车排放污染物的方式主要包括机动车尾气排放和蒸发排放两类。尾气碳排放主要包括 CO₂、CO、HC 及 C 颗粒等，燃油蒸发碳排放主要为碳氢化合物 (HC)。在机动车蒸发排放计算过程中，由于柴油蒸发较少，仅考虑汽油车蒸发排放。碳排放计算公式如下：

$$E = E_1 + E_2 \quad (5-1)$$

其中，E 为机动车碳排放量；E₁ 为尾气碳排放量；E₂ 为机动车行驶及驻车环

节蒸发碳排放量。

以机动车中常见四冲程发动机为例（图 5-1），分别分析汽油车、柴油车的排放过程。道路机动车尾气排放 E_1 主要为燃油在发动机内压缩、燃烧后在排气冲程所排放出的废气，以 CO_2 为主，包含少量不完全燃烧产生的 CO 、 C 颗粒及做工冲程未完全燃烧的 HC 蒸汽。机动车行驶及驻车环节蒸发碳排放 E_2 则包括在进气冲程中从油路或气缸蒸发逸散的 HC 蒸汽及少量曲轴箱窜气。由于柴油密度及粘度较大，蒸发性较弱，且柴油发动机的可燃混合气在气缸内混合，蒸发逸散量极小，因此不考虑柴油车的蒸发排放。而汽油密度及粘度小，且汽油发动机的可燃混合气通常在进气系统中混合，汽油需要保持适宜的蒸发性以保证与空气均匀混合，蒸发排放量较大，因此在本研究主要考虑汽油车的蒸发排放。

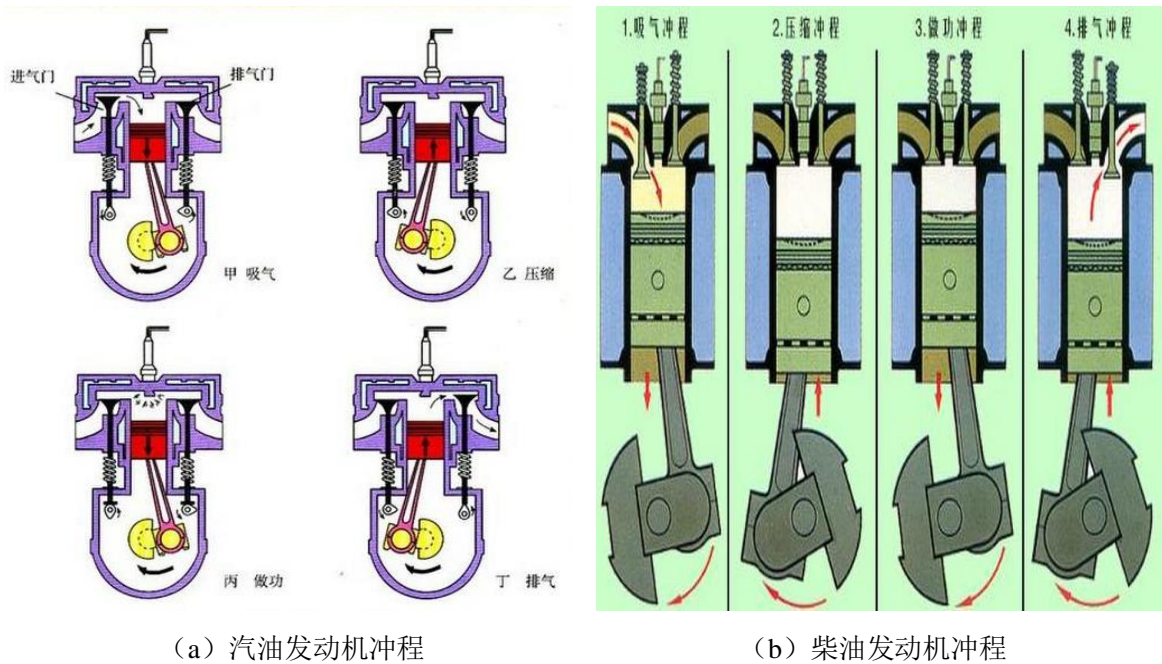


图 5-1 发动机进气及排放冲程

道路机动车尾气排放量 E_1 的计算在机动车分类的第三级排放源层面完成。排放计算公式如下：

$$E_1 = \sum_i P_i \times EF_i \times VKT_i \times 10^{-6} \quad (5-2)$$

其中， E_1 为第 i 类机动车的年碳排放量，单位为 t ； EF_i 为第 i 类机动车的排放因子，单位为 g/km ； P_i 为所在地区 i 类机动车保有量，单位为辆； VKT_i 为 i 类

型车辆的年均行驶里程，单位为 km/辆。

该方法既适用于所有城市在宏观层面计算机动车年排放总量，也可用于微观层面排放模拟。对于拥有交通流数据的城市，也可引入上述公式，开展更为精确的机动车排放计算，只需将其中各参数与交通流对应，采取分时段、分区域计算，最终加和得到年均排放量。

机动车行驶及驻车期间仍然会产生 HC 蒸发，此类排放计入移动源排放总量。在机动车蒸发排放计算过程中，由于柴油蒸发较少，仅考虑汽油车的蒸发排放。该过程排放可按式（5-3）计算：

$$E_2 = (F_1 \times \frac{VKT}{V} + F_2) \times 365 \times P_g \times 10^{-6} \quad (5-3)$$

其中， E_2 为行驶及驻车期间的 HC 蒸发排放量，单位为 t； F_1 为机动车行驶过程中的蒸发排放因子，单位为 g/h； VKT 为当地车辆的单车日平均行驶里程，单位为 km； V 为机动车运行的平均行驶速度，单位为 km/h； F_2 为驻车期间的综合排放因子，主要包括热浸、昼间和渗透过程中排放因子，单位为 g/天； P_g 为汽油车的保有量，单位为辆。机动车 HC 蒸发因子选取《道路机动车排放清单编制技术指南》中的推荐值。

5.1.3 机动车尾气排放因子计算

排放因子指单位活动水平的大气污染物排放量，本研究中碳排放因子指机动车行驶单位距离产生碳排放量。机动车排放因子受多种因素影响，本研究结合车载碳排放测试实验及排放软件 MOVES 计算城市交通碳排放因子。具体计算公式如下：

$$EF_i = BEF_i \times \varphi \times \gamma \times \lambda \times \theta \quad (5-4)$$

其中， EF_i 为 i 类车的排放因子，g/km； BEF_i 为 i 类车综合基准排放因子，g/km； φ 为气象修正因子； γ 为平均速度修正因子； λ 车辆劣化修正因子； θ 为车辆其他使用条件（如油品质量、负载系数）修正因子。综合基准排放因子根据各类车辆类型在平均累积行驶里程和基准行驶工况进行测定，其余指标参照《道路机动车排放清单编制技术指南》中推荐值。

模型中主要敏感性参数是机动车车型、车龄分布、天气、速度、燃油的油品参数和道路类型等。除速度参数外，其它参数在排放计算过程中起调整因子作用，速度参数才是影响机动车排放主要参数。为了表征机动车排放与速度、加速度等参数关系，本研究引入比功率（Vehicle Specific Power, VSP）作为影响机动车排放自变量。机动车比功率定义为单位质量机动车的瞬时功率，是发动机为克服滚动阻力和空气阻力，增加动能和势能输出功率，单位为 kw/t。由于该变量物理意义明确，同时考虑速度、加速度和道路坡度等因素，因而能更好地反映车辆行驶对排放的影响。VSP 计算公式如下：

$$VSP = v \times (a \times (1 + \varepsilon) + g \times \text{grade} + g \times C_R) + 0.5 \times \rho_a \times C_D \times A \times v^3 / m \quad (5-5)$$

其中， v 为车辆瞬时速度，m/s； a 为车辆瞬时加速度， m/s^2 ； ε 为滚动质量系数，表示传动系中转动部分质量当量； g 为重力加速度； grade 为道路坡度； C_R 为滚动阻力系数； C_D 为风阻系数； ρ_a 为空气密度， kg/m^3 ； A 为车辆横截面积， m^2 ； m 为车重， kg 。

由于课题主要实验车辆为轻型车和重型车，针对这两种车型给出相对应 VSP 计算公式。对于轻型车，滚动质量系数 ε 取 0.1，重力加速度 g 为 $9.81m/s^2$ ，滚动阻力系数 C_R 取典型城市路面滚动阻尼系数 0.0135，忽略道路坡度和机动车迎面风速， grade 取为 0， ρ_a 取 $20^\circ C$ 时对应值 ($1.207kg/m^3$)，系数 $(C_D A)/m$ 采用典型轻型车系数 0.0005。具体轻型车 VSP 计算公式如下：

$$VSP = v \times (1.1 \times a + 0.132) + 0.000302 \times v^3 \quad (5-6)$$

对于重型车，由于重型车在车重和车宽方面同轻型车存在较大差异，各系数取值均会不同，不能简单采用轻型车公式来计算重型车 VSP。参考相关研究，本课题重力加速度 g 取为 $9.81m/s^2$ ， ρ_a 取 $20^\circ C$ 时的 $1.207kg/m^3$ ，滚动阻力系数 C_R 取为 0.00938，道路坡度 grade 和滚动质量系数 ε 忽略不计，均取为 0，系数 $(C_D A)/m$ 采用典型重型车系数 0.00028。具体重型车 VSP 计算公式如下：

$$VSP = v \times (a + 0.09199) + 0.000169 \times v^3 \quad (5-7)$$

VSP 变量是目前机动车模型化参数中最为接近实际情况的参数之一。由于它全面地考虑车辆实际行驶中功率输出情况，与油耗排放密切相关，且可利用外部

易于获得的参数进行计算,近年来在各种机动车尾气量化排放模型中使用越来越广泛。美国环保署最新开发的 MOVES 模型同样引入了 VSP 变量,从而实现量化计算机动车的运行工况分布。运行工况分布参数属于速度参数,它同时考虑机动车比功率(VSP)和瞬时速度的关系,可更详尽地表征机动车运行特征。VSP-Bin 分布指车辆在不同 VSP 区间(Bin)下的行驶时间比例,由于 VSP 计算考虑了车辆行驶的逐秒速度和加速度,因此,可利用 VSP-Bin 分布来刻画机动车的行驶状态。鉴此,利用车辆实测行驶数据分别统计不同平均速度下的 VSP-Bin 分布,并结合各 VSP-Bin 下污染物排放率,即可计算得到对应平均速度下的排放。

本研究基于 OBEAS-3000 车载排放检测仪所采集的车辆逐秒行驶和排放数据,获得平均速度以及对应的平均排放。将数据输入排放模型 MOVES,获得相应的逐秒 VSP 值,统计不同平均速度下的 VSP-Bin 分布,最终获得较为准确的机动车排放因子。

5.2 宏观交通碳排放研究

宏观层次路网机动车排放量化评价主要用于分析区域路网机动车排放污染现状。宏观交通碳排放研究主要以城市为研究范围,以年为研究周期,基于城市机动车燃油消耗、车辆年均行驶里程以及区域各类机动车保有量三个参数,从宏观层次量化预测区域路网机动车排放总量,并根据城市年客货运周转量计算城市客货运碳排放强度。

本课题宏观交通碳排放研究选取上海城市为研究对象,根据《上海统计年鉴》及《道路机动车排放清单编制技术指南》、机动车客运货运周转量、机动车保有量等数据计算碳排放总量及碳排放强度。计算公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^n 10^{-11} k_i E L_i \rho q_i \quad (5-8)$$

$$D = \frac{T}{M} \quad (5-9)$$

其中, T 为交通运输碳排放总量, t ; n 为车辆类型数; k_i 为 i 类车年平均行驶里程, km ; E 为消耗 $1kg$ 燃油的碳排放量, g/kg ; L 为 i 类车百公里燃油消耗

量, $10^2\text{L}/\text{km}$; ρ 为燃油密度, kg/m^3 ; D 为交通运输碳排放强度, t/km ; M 为客运或货运周转量, km ; q_i 为 i 类车保有量, 辆。

根据 BP 中国提供基于燃油的碳排放数据, 得到单位燃油碳排放量数据如表 5-2 所示; 同时, 根据《道路机动车排放清单编制技术指南》, 得到机动车年平均行驶里程如表 5-3 所示。

表 5-2 燃油碳排放数据

燃料种类	密度 (kg/m^3)	碳排放量 (g/kg)
汽油	725 (以 93#计)	3070
柴油	835 (以 0#计)	3186

表 5-3 道路机动车年平均行驶里程

机动车类型	年均行驶里程 (km)
小型载客车	18000
出租车	120000
中型载客车	31300
大型载客车	58000
公交车	60000
轻型载货车	30000
中型载货车	35000
重型载货车	75000

根据国家工信部发布的《中国乘用车企业平均燃料消耗量报告》及《重型商用车燃料消耗量限值》, 得到机动车百公里燃油消耗量如表 5-4 所示。通常小型客车、出租车、中型客车及轻型货车为汽油车, 其余车型为柴油车。

表 5-4 机动车百公里燃油消耗量

机动车类型	耗油量 (L)
小型载客车	6.2
出租车	6.2
中型载客车	14.0
大型载客车	23.5
公交车	25
轻型载货车	16.0
中型载货车	27.0
重型载货车	41.0

注: 对汽油车, 其燃油消耗量为表中相应值的 1.3 倍。

根据上海市统计局发布的《2014 上海统计年鉴》, 2013 年上海市各类机动车

保有量数据如表 5-5 所示。

表 5-5 上海市各类机动车保有量

机动车类型	保有量 (万辆)
小型载客车	155.8
出租车	5.3
中型载客车	14.9
大型载客车	4.1
公交车	1.8
轻型载货车	5.1
中型载货车	6.4
重型载货车	8.6
合计	202

根据以上数据分别计算上海市客货运碳排放总量如表 5-6、5-7 所示，由此计算出上海市各类机动车碳排放贡献率如图 5-2 所示，其相应客货运周转量及碳排放强度如表 5-8 所示。

表 5-6 上海市客运碳排放总量

机动车类型	碳排放量 (万吨)
小型载客车	503.1
出租车	114.1
中型载客车	188.9
大型载客车	144.3
公交车	71.8
合计	1022.2

表 5-7 上海市货运碳排放总量

机动车类型	碳排放量 (万吨)
轻型载货车	70.8
中型载货车	160.9
重型载货车	703.5
合计	935.2

表 5-8 上海市客货运周转量及碳排放强度

	客运	货运
周转量	108.7 亿人·km	299.0 亿吨·km
碳排放总量 (万吨)	1022.2	935.2
碳排放强度 ($10^{-4}/\text{km}$)	9.4	3.1

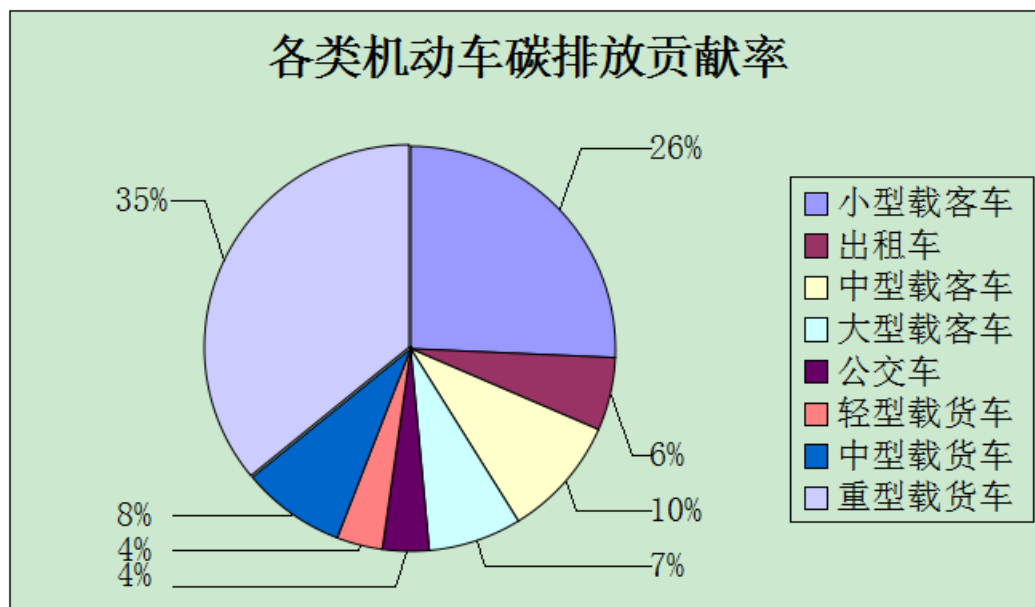


图 5-2 上海市各类机动车碳排放贡献率

结合以上统计数据可知，小型载客汽车及重型载货汽车是城市交通中最主要的两类排放源，其贡献碳排放约占城市交通碳排放总量的 61% 左右。根据《2014 上海统计年鉴》提供的上海市各类机动车保有量数据，重型载货汽车数量仅占全市机动车数量 4.3%，但由于其年平均行驶里程长、荷载大、排量大、排放控制技术落后等因素，构成了城市交通最大的碳排放源，贡献了 35% 的交通碳排放量。小型载客车辆虽然在排量、年平均行驶里程等方面具有优势，但因为其为城市交通的主体，保有量占全市机动车数量的 77%，也成为城市交通主要碳排放源。因此，在进一步的交通碳排放研究及城市碳排放控制环节，应主要考虑小型载客汽车和重型载货汽车两类机动车。需要注意的是，在宏观层面碳排放研究中只统计在上海市挂牌的机动车，事实上，上海城市道路中还存在大量外地车辆，因而需要在中观层面对具体路网的机动车碳排放进行研究。

5.3 中观交通碳排放研究

中观层面机动车排放研究主要量化评价路网中各路段污染物排在时间和空间上的变化规律，及时发现重污染路段并分析确定其形成原因，为环境管理者制定合理、有效的排放控制策略奠定基础。本课题中观交通碳排放研究主要基于第二章

所述交通碳排放移动监测及交通流监测, 获取城市 CBD、市郊等区域路网上的机动车平均碳排放及交通特征参数。中观层次行驶和排放数据获取即基于所收集的逐秒行驶和排放数据, 以 1 分钟为间隔统计平均速度、平均加速度和平均 VSP 三个行驶参数及其所对应的平均排放率。以此分析中观碳排放在时间(平峰、高峰)、空间(主干道、次干道等)上的变化特征。最后结合交通仿真软件 VISSIM 对路网交通流、道路特征、交通管理与控制措施及交叉口信号配时进行仿真, 建立路网模型。最后, 将输出交通流参数导入排放软件 MOVES 中, 得到区域路网的碳排放情况。

中观层次碳排放研究所选取的区域路网包括所有城市道路类型。机动车逐秒碳排放数据由 OBEAS-3000 设备进行采集。机动车行驶的微观参数, 如发动机转速、机动车速度、加速度等参数也由 OBEAS-3000 设备进行采集, 计算对应 VSP 值, 并统计机动车在该区域路网中的速度、加速度及 VSP 分布情况。对逐秒行驶及排放数据进行累加, 并获得平均值, 即得到中观层次的行驶参数(平均速度、平均加速度和平均 VSP)和平均排放率。在宏观交通碳排放分析中可知, 轻型汽油车是城市机动车类型的主体, 其无论在保有量上还是污染物排放分担率上都占据了城市机动车较大比例。而重型柴油车则是城市交通中最主要的碳排放源。因此, 课题实验选取城市道路上较为常见的测试车辆类型, 其基本信息如表 5-9 所示。

表 5-9 测试车辆基本信息

制造商	型号	排量(L)	制造年份	车重(kg)	车辆类型
东风雪铁龙	富康 DC7140	1.4	2001	927	轻型汽油车
丹东黄海	DD6112H2A	7.8	2000	10900	重型柴油车

测试结束后, 对于软件导出的数据, 需要首先进行初步处理, 才能用于之后基于 VSP 的排放建模计算。初步处理主要包括对所采集数据情况的大致了解和数据质量控制两个环节。

首先, 对所采集数据的速度和加速度分布情况进行分析。为了进行基于 VSP 的排放建模, 需要所采集数据尽可能覆盖到速度和加速度的各个区间。以 2014 年 11 月 15 日于山西太原的监测数据为研究实例, 基于移动碳排放实测实验建立的与平均速度、加速度及 VSP 相对应的碳排放数据如表 5-10 所示。机动车 VSP

分布如图 5-3 及表 5-11 所示。

表 5-10 中观层次行驶及碳排放数据

车辆名称	平均速度 (km/h)	平均加速 度 (m/s ²)	平均 VSP (kw/t)	平均 C 排放 (g/s)	平均 HC 排放 (g/s)	平均 CO 排放 (g/s)	平均 CO ₂ 排 放 (g/s)
富康	26.8	0.04	1.56	0.001	0.002	0.04	1.3
黄海	21.3	0.01	2.13	0.01	0.008	0.02	2.2

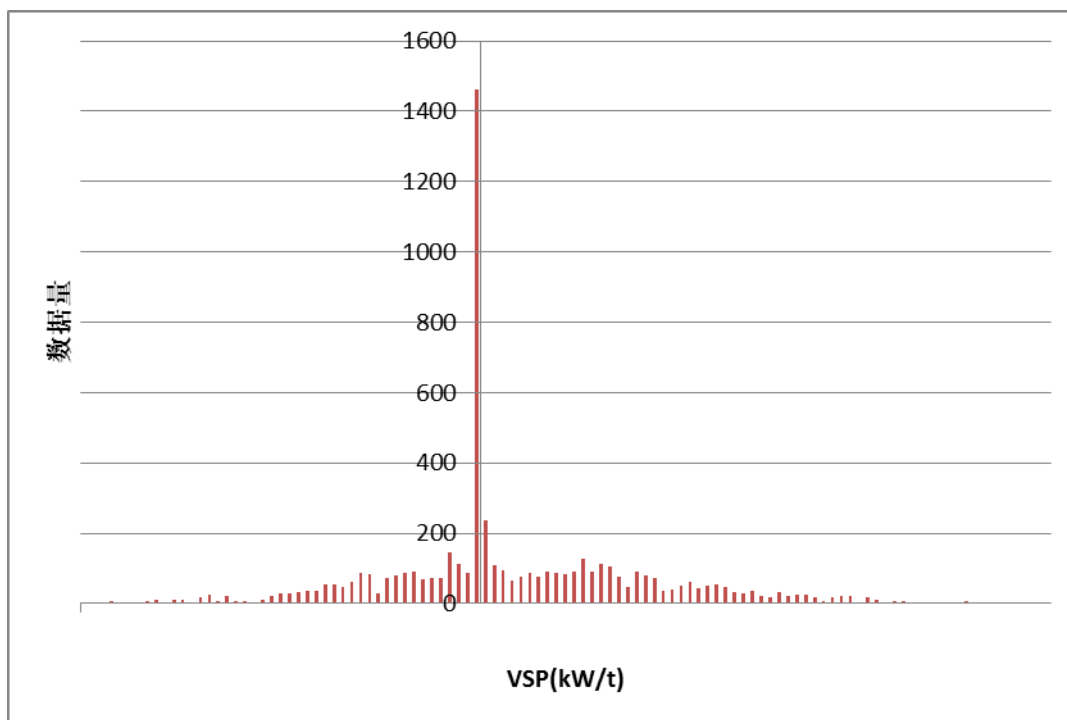


图 5-3 VSP 频数分布

表 5-11 不同 VSP 区间数据所占比重

VSP 区间	所占比重
[-5,5]	54.93%
[-10,10]	66.32%
[-15,15]	77.82%
[-20,20]	85.86%
[-25,25]	90.31%
[-30,30]	94.22%
[-35,35]	96.53%
[-40,40]	98.13%

VSP 值落在区间[-20, 20]内的数据量占总体的 85.86%，落在区间[-25, 25]内的数据量占总体的 90.31%，落在区间[-30, 30]内的数据量占总体的 94.22%。为了准确量化基于 VSP 的排放率，结合实际排放数据情况，本课题在区间[-25, 25]内，选取 1kw/t 为步长进行 VSP 的 Bin 区间划分，在区间[-25, 25]外，对 VSP 的 Bin 区间进行粗略划分。最后，将所得的 VSP-Bin 区间分布输入到排放模型 MOVES 中。MOVES 模型是美国环保署开发，集宏观、中观和微观于一体的机动车尾气量化模型。其核心模块主要由四部分组成：总体行驶特征生成块、运行工况分布生成块、排放源 Bin 分布生成块和排放计算块。在中观层次排放分析中，该模型 VSP-Bin 分布来描述车辆在不同平均速度下的行驶状态，从而计算该工况下机动车碳排放总量。

中观交通碳排放研究将所测得的工况分布参数、测试路网参数、实验车辆参数、气象数据及燃油参数输入到排放模型 MOVES 的 Data Manager 中（图 5-4），并定义监测路网的道路类型、机动车类型（图 5-5）、监测时间及所要输出的碳排放物类型（图 5-6），最终得到与 VSP-Bin 相对应的机动车碳排放量，如表 5-11、5-12 所示。实验车各类碳排放物随 VSP 区间变化情况如图 5-7、图 5-8 所示。由表 5-11、5-12 的排放数据可知，重型车由于负载和排量的关系，其碳排放量远大于轻型车。对于 CO₂ 排放，由于 VSP 升高，CO₂ 排放也随之升高，轻型车和重型车的 CO₂ 排放均在第 60 个 VSP-Bin 区间达到最大。从图 5-7 和 5-8 可以看出，在前 30 个 VSP 区间 CO₂ 排放量处于较低水平，波动幅度较小，而在后 30 个 VSP 区间有明显的上升趋势。CO 及 HC 排放则波动性较大，VSP 达到峰值时二者的排放并未达到最大值。轻型车的 CO 及 HC 排放均在第 47 个 VSP-Bin 区间达到最大。重型车 CO 排放在第 43 个 VSP-Bin 区间达到最大，而 HC 排放在第 27 个 VSP-Bin 区间达到最大。从表 5-12 和 5-13 可知，CO 及 HC 排放远小于 CO₂ 排放，尤其对于重型载货汽车，在部分 VSP 区间排放量相差达到 4 个数量级。因此，在图 5-7 中对 CO₂ 排放量取 log5，在图 5-8 中对 CO₂ 排放量取 log10，使 CO₂ 与 CO、HC 排放量达到同一数量级。图中可看出，CO 及 HC 排放量随 VSP 变化趋势不明显，说明其排放与 VSP 不呈线性关系，除受 VSP 影响外，还可能与具体机动车行驶状态有关，因此需在微观层面进一步研究。

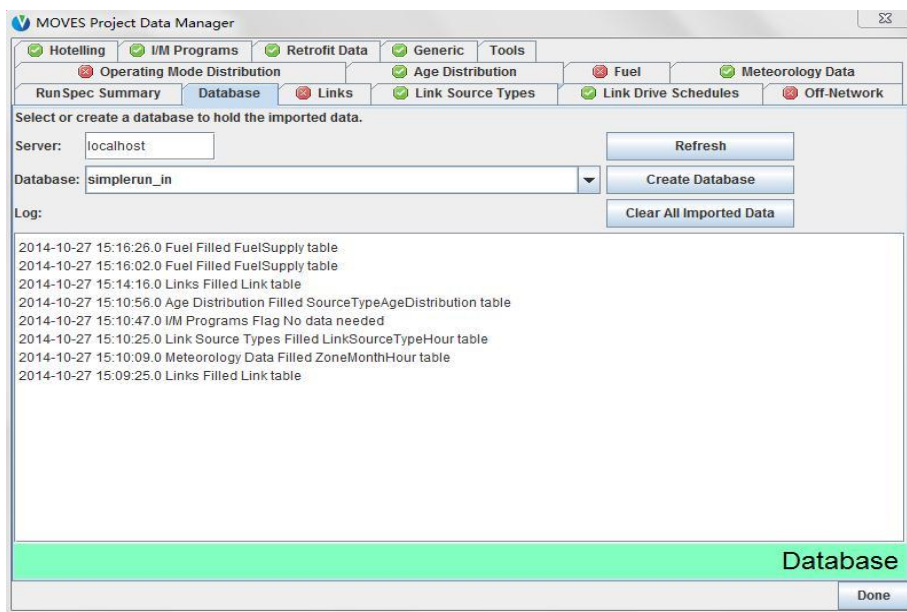


图 5-4 MOVES Data Manager 参数输入

Fuels:	Source Use Types:	Selections:
Compressed Natural Gas (CNG)	Combination Long-haul Truck	Gasoline - Passenger Car
Diesel Fuel	Combination Short-haul Truck	Diesel Fuel - Intercity Bus
Electricity	Intercity Bus	
Gasoline	Light Commercial Truck	
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Motor Home	
Placeholder Fuel Type	Motorcycle	
	Passenger Car	
	Passenger Truck	
	Refuse Truck	
	School Bus	
	Single Unit Long-haul Truck	
	Single Unit Short-haul Truck	
	Transit Bus	

图 5-5 实验机动车类型输入

图 5-6 MOVES 排放物输入

表 5-12 小型载客车 VSP 的 Bin 区间所对应的尾气排放率

编号	VSP 范围		CO(mg/s)	HC(mg/s)	CO ₂ (mg/s)
	<=	>			
1	-40	-	4.2135	0.1326	115.23
2	-35	-40	6.1359	0.1532	107.32
3	-30	-35	5.9628	0.1920	126.38
4	-26	-30	7.9937	0.1603	78.76
5	-25	-26	8.1050	0.0457	111.58
6	-24	-25	7.0799	0.1218	110.69
7	-23	-24	6.0548	0.1979	109.80
8	-22	-23	3.4749	0.2678	178.51
9	-21	-22	3.7476	0.1574	87.75
10	-20	-21	7.4090	0.2023	76.43
11	-19	-20	8.3285	0.2147	151.74
12	-18	-19	8.5415	0.2043	114.30
13	-17	-18	8.7036	0.2414	156.25
14	-16	-17	7.8573	0.2785	102.60
15	-15	-16	9.1133	0.2917	142.22
16	-14	-15	6.8725	0.2219	103.41
17	-13	-14	7.8667	0.3202	188.39
18	-12	-13	9.1699	0.3785	165.48
19	-11	-12	4.4606	0.0768	91.86
20	-10	-11	8.0774	0.2093	96.91

编号	VSP 范围		CO(mg/s)	HC(mg/s)	CO ₂ (mg/s)
	<=	>			
21	-9	-10	11.0279	0.3928	143.95
22	-8	-9	8.6949	0.2475	115.76
23	-7	-8	12.6008	0.7923	213.00
24	-6	-7	5.5363	0.6539	98.75
25	-5	-6	5.7009	0.2165	160.03
26	-4	-5	15.3297	0.6841	154.90
27	-3	-4	12.7009	0.6208	197.29
28	-2	-3	11.0877	0.5323	127.79
29	-1	-2	8.7278	0.2035	153.13
30	0	-1	6.0766	0.0939	96.92
31	1	0	4.1035	0.1191	115.68
32	2	1	6.2239	0.3809	188.01
33	3	2	8.3442	0.2157	219.44
34	4	3	7.8923	0.5130	227.28
35	5	4	10.2973	0.2560	137.91
36	6	5	14.7986	0.5777	313.58
37	7	6	12.0332	0.6258	311.92
38	8	7	9.2679	0.6739	310.26
39	9	8	12.7450	0.3259	362.68
40	10	9	9.2362	0.5862	247.15
41	11	10	14.7761	0.4134	234.40
42	12	11	14.8004	0.4881	313.19
43	13	12	14.8248	0.8242	270.37
44	14	13	11.5860	0.2890	279.80
45	15	14	13.0163	0.5046	346.17
46	16	15	14.4467	0.7203	412.55
47	17	16	18.0342	1.0679	315.12
48	18	17	16.9307	1.0555	352.31
49	19	18	15.2534	0.6262	317.49
50	20	19	11.4829	0.6166	365.85
51	21	20	7.7123	0.6070	414.20
52	22	21	8.1585	0.8775	497.16
53	23	22	8.6046	0.3137	351.81
54	24	23	11.2771	0.8572	378.22
55	25	24	14.0375	0.6171	444.61
56	26	25	15.4903	0.4653	308.75
57	30	26	16.4351	0.8108	556.43
58	35	30	16.7578	0.6343	455.37

编号	VSP 范围		CO(mg/s)	HC(mg/s)	CO ₂ (mg/s)
	<=	>			
59	40	35	7.9562	0.6894	483.88
60	-	40	14.5841	0.7984	645.24

表 5-13 重型车 VSP 的 Bin 区间所对应的尾气排放率

编号	VSP 范围		CO(mg/s)	HC(mg/s)	CO ₂ (mg/s)
	<=	>			
1	-40	-	1.3254	1.7786	682.12
2	-35	-40	1.2235	1.9365	726.29
3	-30	-35	1.0744	2.5496	858.61
4	-26	-30	1.4403	2.1283	535.05
5	-25	-26	1.4604	0.6068	758.02
6	-24	-25	1.2757	1.6175	751.98
7	-23	-24	1.0910	2.6283	745.95
8	-22	-23	0.6261	3.5564	1212.72
9	-21	-22	0.6753	2.0901	596.14
10	-20	-21	1.3350	2.6860	519.27
11	-19	-20	1.5007	2.8502	1030.88
12	-18	-19	1.5390	2.7130	776.52
13	-17	-18	1.5682	3.2057	1061.52
14	-16	-17	1.4158	3.6984	697.03
15	-15	-16	1.6421	3.8736	966.19
16	-14	-15	1.2383	2.9469	702.55
17	-13	-14	1.4174	4.2512	1279.88
18	-12	-13	1.6523	5.0256	1124.23
19	-11	-12	0.8037	1.0199	624.04
20	-10	-11	1.4554	2.7793	658.35
21	-9	-10	4.5650	4.6292	1091.15
22	-8	-9	3.5993	2.9163	877.48
23	-7	-8	5.2161	5.3109	1614.62
24	-6	-7	2.2918	7.7055	748.58
25	-5	-6	2.3599	2.5517	1213.07
26	-4	-5	6.3457	8.0613	1174.20
27	-3	-4	5.2575	7.3160	1495.54
28	-2	-3	4.5898	6.2731	968.71
29	-1	-2	11.4613	2.2593	3384.44
30	0	-1	7.9797	1.0422	2142.02
31	1	0	9.9653	0.9430	3695.48

编号	VSP 范围		CO(mg/s)	HC(mg/s)	CO ₂ (mg/s)
	<=	>			
32	2	1	15.1145	3.0147	6006.36
33	3	2	20.2637	1.7077	7010.58
34	4	3	22.5854	5.1215	7239.49
35	5	4	29.4676	2.5556	4392.80
36	6	5	42.3488	5.7677	9988.17
37	7	6	38.7517	5.4165	9565.06
38	8	7	35.1546	5.0654	9141.95
39	9	8	35.0945	2.4498	10686.49
40	10	9	35.0343	4.4063	7282.56
41	11	10	43.5650	2.6068	5721.28
42	12	11	43.6367	3.0776	7644.45
43	13	12	43.7085	5.1968	6599.25
44	14	13	34.1595	1.8225	6829.51
45	15	14	28.6222	2.6990	8209.53
46	16	15	23.0848	3.5755	9589.56
47	17	16	28.8176	5.3012	7324.95
48	18	17	27.0542	5.2399	8189.39
49	19	18	23.6609	2.4960	7202.95
50	20	19	17.8121	2.4577	8299.92
51	21	20	11.9633	2.4194	9396.88
52	22	21	11.0118	3.7366	11293.46
53	23	22	10.0602	1.3359	7991.67
54	24	23	13.1847	3.6503	8591.57
55	25	24	16.4121	2.6278	10099.71
56	26	25	18.1106	1.9814	7013.47
57	30	26	19.2152	3.4529	12639.78
58	35	30	19.5925	2.7011	10344.23
59	40	35	9.3020	2.9358	10991.82
60	-	40	17.0511	4.6773	12091.00

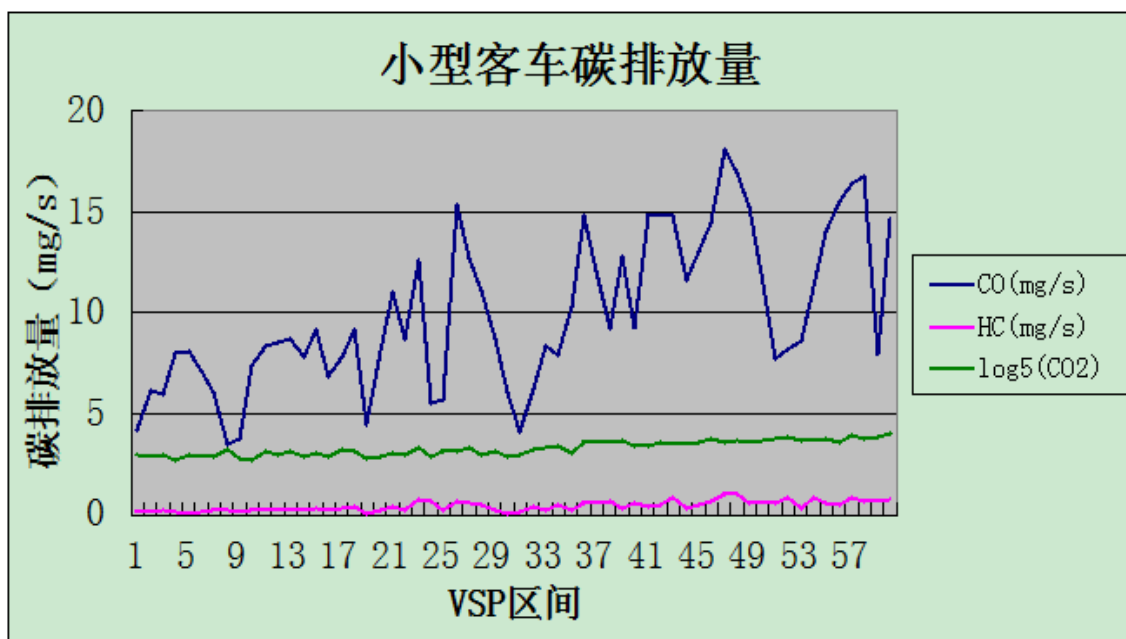


图 5-7 小型载客汽车碳排放量随 VSP 变化情况

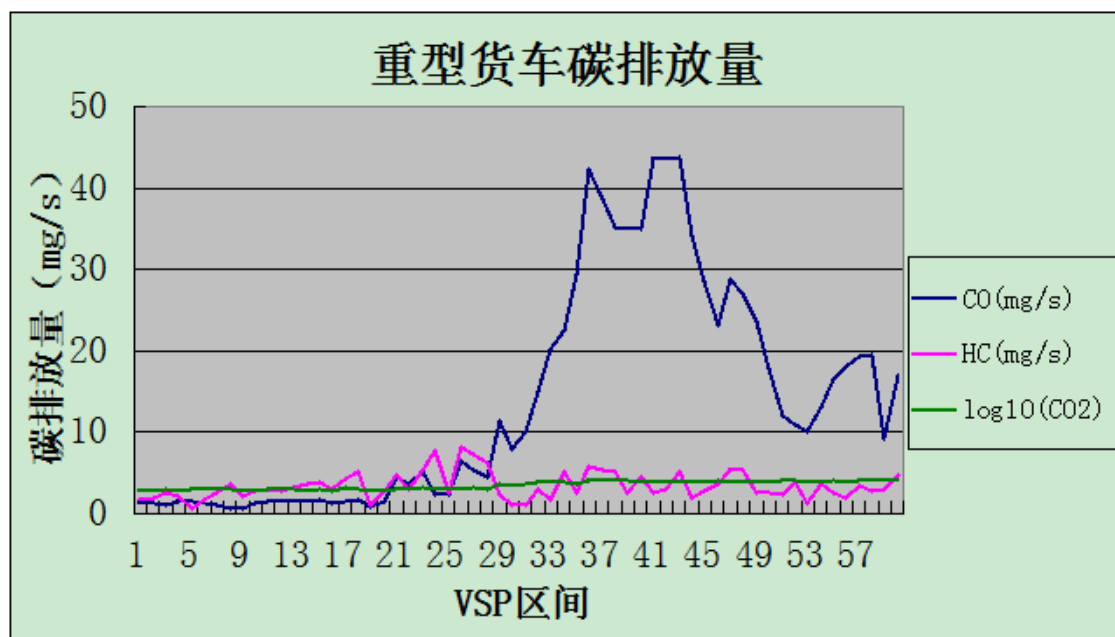


图 5-8 重型载货汽车碳排放量随 VSP 变化情况

图 5-7 及 5-8 中，CO₂ 排放与 VSP 变化呈线性关系，进而分别对两类车辆的 CO₂ 排放进行线性拟合，结果如图 5-9 和 5-10 所示。

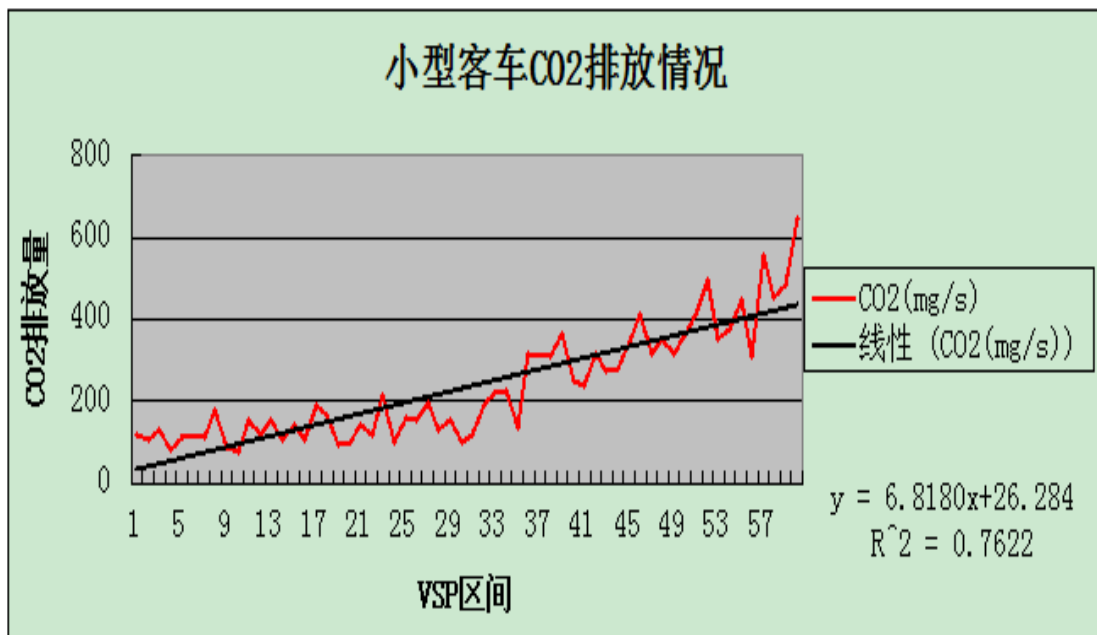


图 5-9 小型载客汽车 CO₂ 排放情况

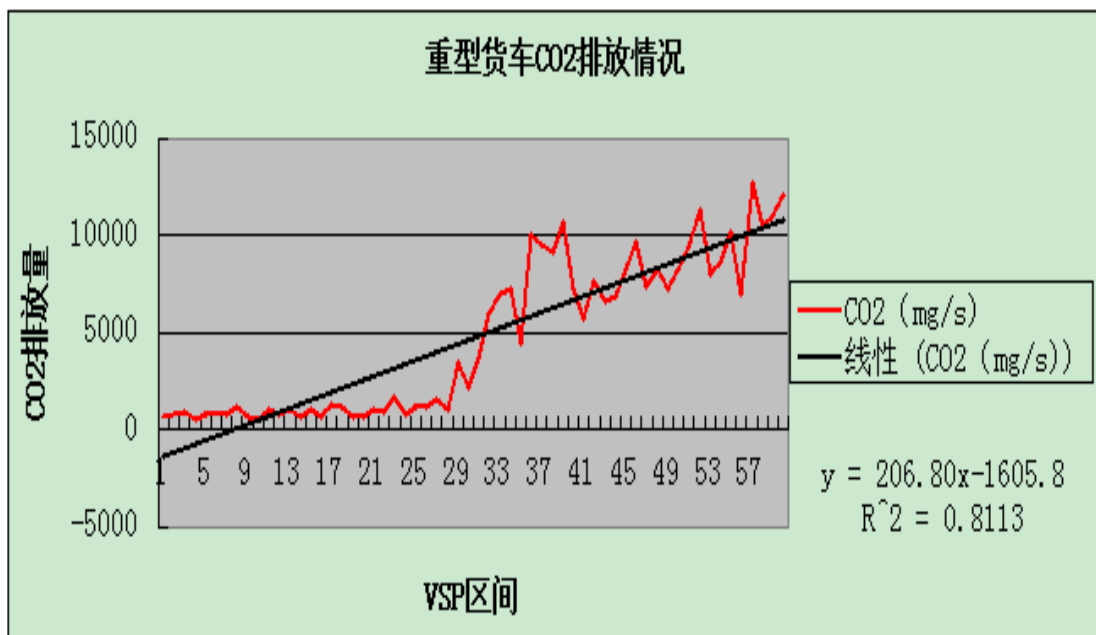


图 5-10 重型载货汽车 CO₂ 排放情况

小型客车的 CO₂ 排放量线性拟合公式为 $y = 6.818x + 26.284$, 拟合 R^2 为 0.7622。

重型货车的 CO₂ 排放量线性拟合公式为 $y = 206.8x - 1605.8$, 拟合 R^2 为 0.8113。

5.4 微观交通碳排放研究

微观交通碳排放研究主要针对城市周边的高速路、国道等公路进行。相对于

城市道路，公路的交通量较少，机动车处于自由流状态时间较长。此时，机动车碳排放除了受机动车自身排放特性影响外，主要受机动车行驶状态影响。微观交通碳排放研究旨在通过单车、逐秒的微观碳排放监测及行驶状态监测，分析污染物逐秒的排放率(单位：g/s)同逐秒行驶状态的变化规律，研究不同污染物与行驶参数间的相关关系。

本研究选取速度、加速度、发动机转速及 VSP 值作为行驶状态参数，同样利用 OBEAS-3000 设备采集机动车逐秒行驶数据及逐秒碳排放数据，选取无锡市通锡高速作为研究路段进行碳排放研究。以 2014 年 11 月 25 日于无锡市通锡高速顾山段所测微观碳排放数据及行驶状态数据为研究对象，数据字段如表 5-14 所示。在碳排放物中，HC 排放、CO 排放和 C 颗粒排放是对行人和环境造成危害的主要含碳污染物，需要抑制其排放量并希望其尽可能完全燃烧转化为 CO₂ 排放。CO₂ 虽然为大气中主要的温室气体，但其排放量主要由汽车自身性能与负载决定，与行驶状态关系较小。由于实验车辆为小型汽油车，尾气排放中的 C 含量较低。同时，在中观碳排放研究中，CO 及 HC 的排放跟具体的行驶状态相关，因此在微观碳排放研究中主要分析 HC、CO 排放同机动车行驶参数间的关系。

表 5-14 微观机动车行驶状态及碳排放数据示例

时间	速度 (km/h)	加速度 (m/s ²)	VSP (kw/t)	发动机转速 (r/min)	C 排放 (g/s)	HC 排放 (g/s)	CO 排放 (g/s)	CO ₂ 排放 (g/s)
16:59:09	24.3	0.17	2.22	2076	0.00006	0.00329	0.00464	1.78
16:59:10	23.8	-0.17	-0.25	915	0	0.00334	0.00299	1.97
16:59:11	24.1	0.08	1.58	1577	0.00002	0.00269	0.00229	1.70
16:59:12	24.1	0.03	1.17	1132	0	0.00122	0.00181	0.83
...

图 5-11 和 5-12 为轻型车在一次测试过程中速度和加速度分布情况。轻型车在测试路线上反复运行过程中，车辆行驶速度反复起落，基本覆盖到 0 到 120km/h 的各段速度区间。图 5-11 中可看出，轻型车在测试路线上反复运行过程中，其车辆加速度同行驶速度一样，反复起落，基本覆盖-5 到+5m/s² 的各段加速度区间。可见，所选测试路段较为理想，车辆运行情况符合预期，满足研究需求。

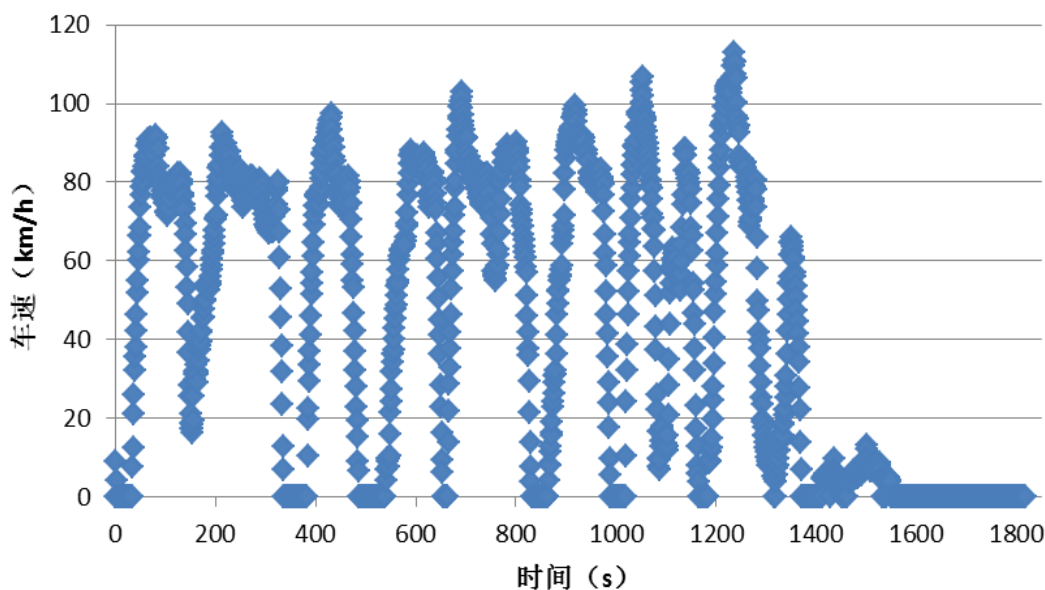


图 5-11 实验车速度分布

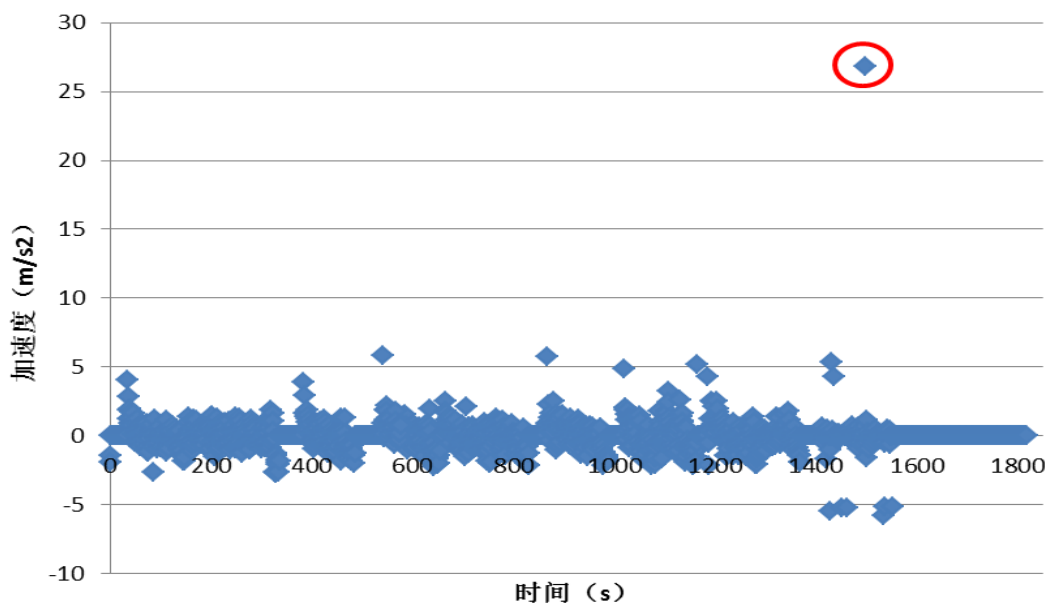


图 5-12 实验车加速度分布

对原始采集数据需进行数据质量控制，主要对实验中所采集数据进行初步处理，对于几秒的相关缺失数据进行平滑处理，对于明显不符合常理的数据进行处理或者删除。例如，图 5-12 中用红圈圈出的数据点，明显不符合实际，则需要进行相应删除处理，并利用线性插值法进行补齐和修正。具体计算公式如下：

$$x_{t_j} = \frac{(t_j - t_i)x_{t_k} + (t_k - t_j)x_{t_i}}{t_k - t_i} \quad (5-10)$$

其中, t_j 为缺失数据出现时刻; t_i 、 t_k 分别为 t_j 左邻和右邻时刻; x_{t_j} 为 t_j 时刻修正后数据值; x_{t_i} 和 x_{t_k} 分别为 t_i 、 t_k 时刻对应的数据值。

5.4.1 速度对碳排放影响分析

机动车逐秒排放随速度的变化如图 5-13 所示。可以看出, 对于实验车来说, 相同速度下 HC 和 CO 排放的离散程度较大, 并且大部分排放值较低, 但也存在一定数量的高排放值。CO 排放离散程度相对较小, 通过建立一元线性回归模型可以看出 CO 排放存在随速度的增大而增长的趋势。同样的, 通过建立一元线性回归模型, HC 排放存在随速度的增大而增长的趋势, 并且增大趋势比 CO 明显。在发动机台架试验中, 速度增大时发动机喷油量增大、气缸温度升高, 导致汽油不完全燃烧产生的 CO 排放及未完全燃烧的 HC 蒸发量增加。而道路实验中 CO 及 HC 的排放增长均相对平缓, 说明实验车所配备的尾气催化装置对抑制有毒碳排放物有明显作用。

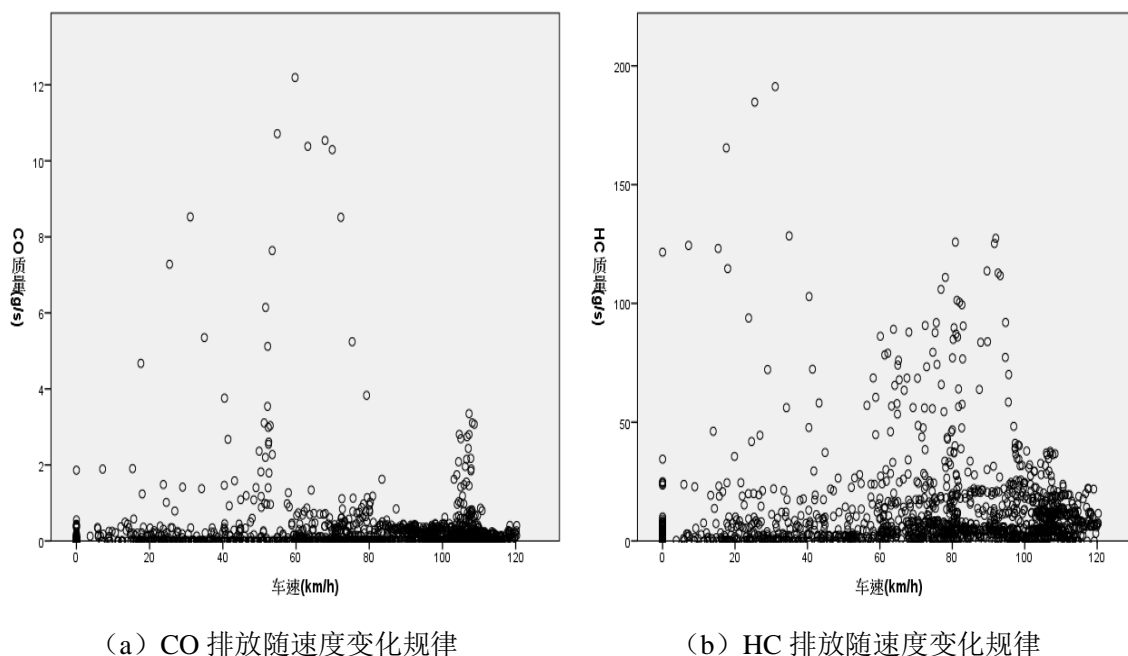


图5-13 CO、HC排放随速度变化趋势

5.4.2 加速度对碳排放影响分析

加速度对机动车逐秒碳排放的影响如图 5-14 所示。机动车加速度主要分布在 -3 至 3m/s² 之间。对于实验车来说，相同加速度下 HC 和 CO 排放的离散程度较大，并且大部分排放值较低，在加速度较高时出现一定数量的高排放值，主要由于加速过程需向发动机供给更多燃油。当加速度在 -1 至 1m/s² 之间排放量 CO、HC 排放量较大，CO、HC 排放较大数值均出现在加速度 1m/s² 附近。

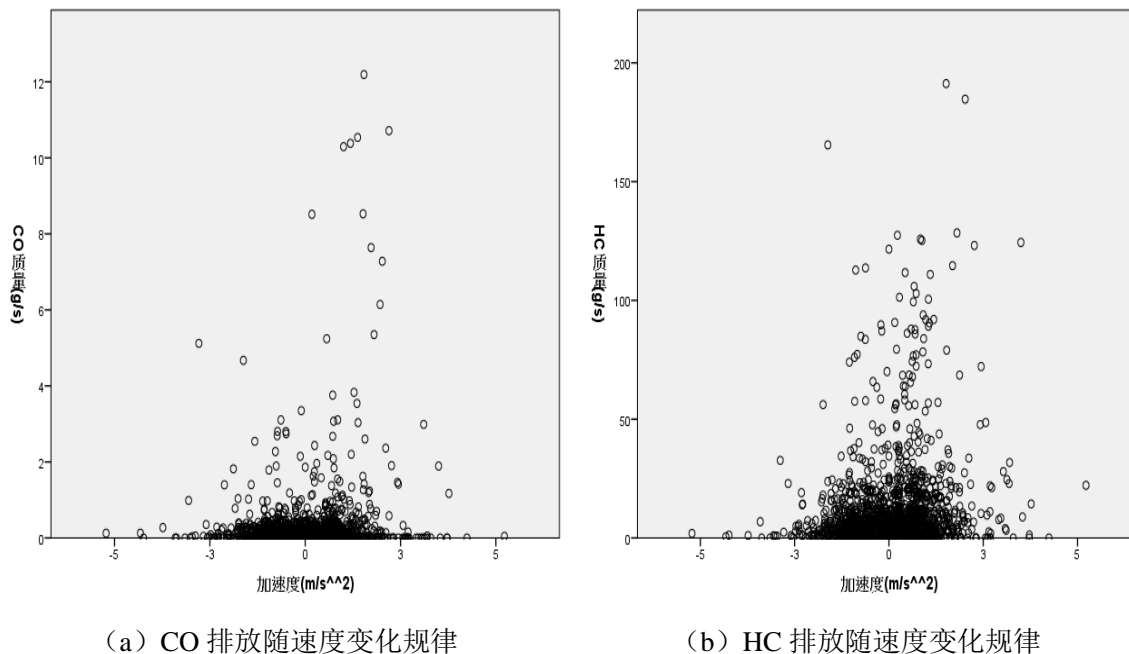
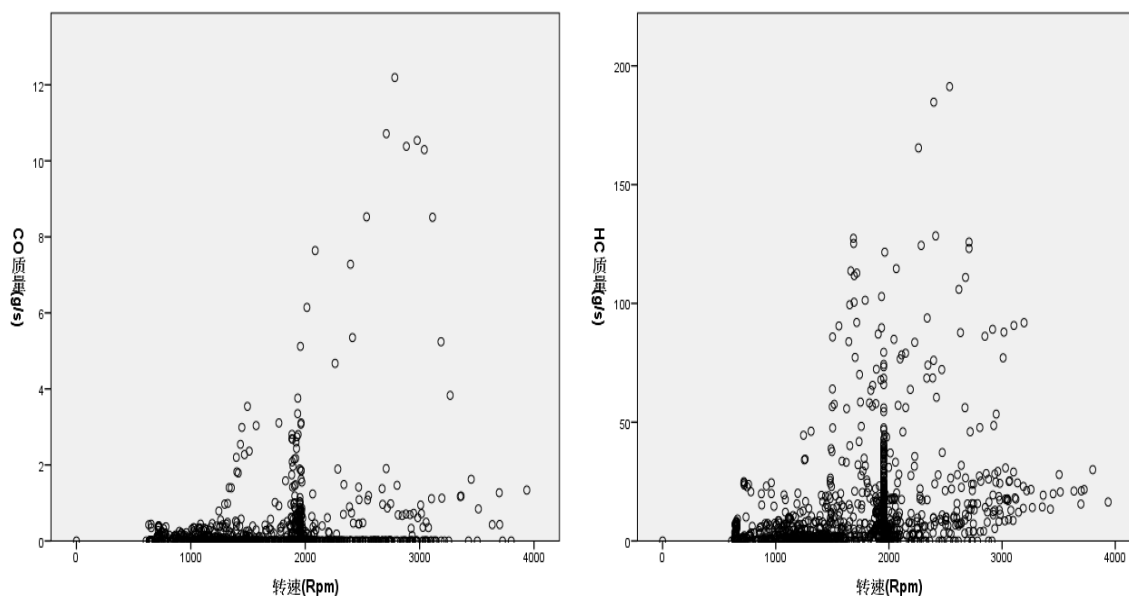


图5-14 CO、HC排放随加速度变化趋势

5.4.3 转速对碳排放影响分析

机动车逐秒排放随发动机转速的变化如图 5-15 所示。可以看出，在发动机转速低于 2000r/min 时，CO 排放量较高，当转速高于 2000r/min 时，CO 排放较低且较为平稳。这是由于转速提高后空燃比提高，汽油燃烧效率相应提高，因此 CO 排放量减少。同时，机动车在提高转速后变速器会切换到更高档位，提高了燃烧效率。相同转速下 HC 排放离散程度较高，在转速高于 3000r/min 时有上升趋势，这是由于转速升高过程中燃烧不稳定，气缸内可燃混合气循环速度加快，燃油没有足够时间完全燃烧就排放，未来及参加燃烧的燃料会直接从排气管排出，造成 HC 排放升高。



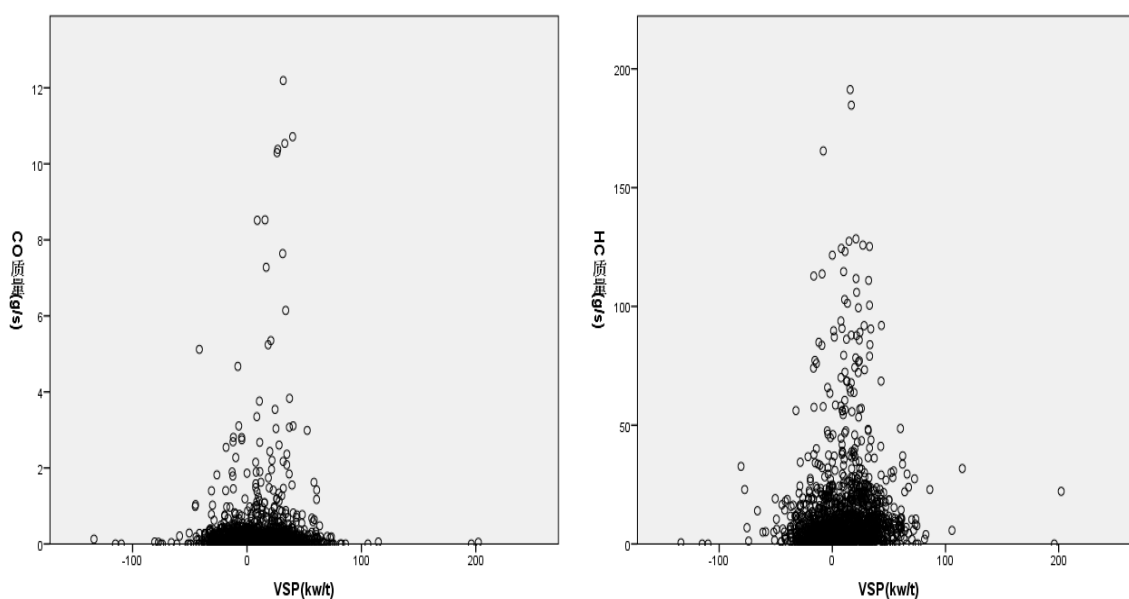
(a) CO 排放随转速变化规律

(b) HC 排放随转速变化规律

图5-15 CO、HC排放随转速变化趋势

5.4.4 VSP 对碳排放影响分析

采用本章 5.3 节公式 5-6 计算实验车的 VSP 值，得到逐秒排放随 VSP 变化如图 5-16 所示。可以看出，车辆 VSP 主要分布在-100 至 100kw/t 之间。当 VSP>0 时，HC 排放量有所升高，而 CO 排放变化则相对平缓。CO 及 HC 较大排放值均出现在 VSP=0 附近。这主要由于当 VSP=0 时，气缸内可燃混合气通常处于过浓状态，造成燃烧不充分现象较为严重，因而容易出现 CO、HC 排放量过高。



(a) CO 排放随 VSP 变化规律

(b) HC 排放随 VSP 变化规律

图5-16 CO、HC排放随VSP变化趋势

5.4.5 机动车行驶特性与碳排放相关性

进一步采用皮尔逊相关系数分析各污染物排放同行驶参数的相关性，分析结果如表 5-15 所示。可以看出，各碳排放污染物排放同行驶参数均呈正相关，其中同 VSP 的相关性最高，同速度及转速的相关性稍低于 VSP，而同加速度的相关性较差，这也表明 VSP 更能够有效地反映逐秒排放的动态变化。

表5-15 碳排放污染物同机动车行驶参数相关性

测定指标	CO(g/s)	HC(g/s)
速度(km/h)	0.354	0.317
加速度(m/s ²)	0.110	0.202
转速(r/min)	0.209	0.305
VSP(kw/t)	0.394	0.337

由以上微观层次排放特征分析可知，速度、加速度、转速和 VSP 四个行驶参数对机动车排放均存在一定正相关影响。其中速度、加速度和转速变量分别从不同角度反映车辆行驶状态对排放的影响，而 VSP 变量由于综合考虑速度和加速度等多方面行驶信息，其对污染物排放的影响也最为显著。

5.5 本章小结

本章主要工作是利用 PEMS 实测数据及上海市统计数据对宏观、中观、微观三个层次分析交通碳排放的形成机理。首先对道路排放源进行分级分类，并从发动机工作原理的角度分析了不同碳排放物的形成过程以及影响其排放量和排放速率的因素，明确了排放因子的计算方法。其次从宏观角度出发，以上海市为例，利用统计数据计算上海市各类机动车 2013 年碳排放总量及碳排放强度。分析得出小型客车及重型货车是上海交通最主要的两大碳排放源。进而在中观层次中以这两类车型为研究对象，对其在路网中的行驶工况进行片段划分，利用排放模型 MOVES 计算两类车辆不同工况分布区间所对应的排放因子。最后对于影响机动车行驶工况的速度、加速度、转速等微观行驶参数，在微观层次分别分析各个微观参数对机动车碳排放的影响。分析发现在微观层次，速度、加速度、转速和 VSP 四个参数对机动车排放均存在一定的正影响，其中 VSP 变量由于综合多方面的行驶信息，其对污染物排放影响也最为显著。

第六章 城市交通碳排放分布研究与实证

机动车碳排放是城市碳排放污染的主要构成之一，城市道路及交叉口是机动车排放污染的主要场所，需要在碳排放研究的基础上，进一步对该区域碳排放扩散分布进行深入分析。车辆碳排放物进入大气后的分布情况，既与道路中车辆排放的碳污染物总量有关，还与碳排放物在大气中的运动与扩散规律有关。如过车辆的碳排放物能在空气中完全扩散、稀释，则空气质量就会逐渐恢复原有状态。反之，如果碳污染物的排放量在近地面空气中聚集，并持续在一定时间和形成一定的浓度，那就会产生空气污染现象。

本章基于机动车排放因子和污染物排放源强的研究，充分考虑影响排放物扩散的气象、地形等因素，开展对城市道路及平面交叉口的碳排放扩散规律和浓度分布研究。

6.1 影响碳排放物扩散的因素分析

影响碳排放物扩散的环境因素主要有气象、地形和地物等。其中气象因素主要包括风速、风向、温度和大气稳定度等。风速与风向两个因素是空气的整体流动现象，其对大气污染物具有整体输送效果。风速越大单位时间内将污染物输送得越远，同时混入的清洁空气也越多，污染物稀释越快，污染物扩散后形成的浓度低。但风速过大时，大气中漂浮的污染物会发生下泄作用，使近地面的污染物浓度增加。风向主要是指空气在水平方向的运动，决定了污染物的输运方向，其导致污染源下风向区域的污染浓度比上风区域高。风向和交通排放线源若形成不同的夹角，则污染物扩散后影响的区域和影响程度均会不同。

风速决定污染物的整体输运，但输运过程中污染物与清洁空气之间的质量、动量与能量的交换，即渗混、稀释过程，主要通过湍流与分子扩散实现。大气湍流能够引起空气微团之间的强烈交换和混合，其速率是分子扩散速率的 105-106 倍。因此大气湍流是污染物稀释的主要影响因素，而对于城市内街道峡谷内的湍流又受大气边界层风场、局地建筑、树木、太阳辐射、机动车运动等诸多因素的综合影响，其强度分布十分复杂。

大气稳定度指大气层在垂直方向的相对稳定程度。空气在收到扰动时,会产生垂直方向的运动。如果收到扰动时移动距离较小,扰动结束后有回到原来位置的趋势,则大气层处于稳定状态,反之则为不稳定状态。大气稳定度是影响污染物扩散的重要因素,大气处于稳定状态,污染物在大气中不易扩散和稀释,有可能长期聚集于地面造成污染。而大气越不稳定,污染物越容易扩散和稀释。

地形直接影响气流运动,因而也直接影响大气污染的程度。污染物在扩散过程中,遇到道路纵坡时在迎风面会产生下沉作用,使附近地区受到污染。当纵坡坡度较小,污染物很容易越过纵坡,在背风面下沉,使该地区受到污染。

城市交通碳排放物的扩散受地物影响较为显著。其建筑物占据较大空间,各等级道路在建筑物间形成街道峡谷。机动车在街道峡谷内行驶,尾气直接排放在峡谷底部:道路两侧建筑物阻碍了大气对机动车尾气的直接稀释,而是通过建筑物顶部对大气流动的剪切作用,在迎风建筑处发生下洗现象推动街道峡谷内的空气流动,将峡谷底部的大气污染物输送到屋顶,在屋顶剪切层处与外界大气进行交换,达到污染物的稀释与清除。道路绿化带阻碍街道峡谷内的空气流动,降低峡谷内污染物的扩散能力;太阳辐射使得街道峡谷内局部气流不均匀升温而改变峡谷内的流场特征,从而对污染物扩散产生一定的影响。因此街道峡谷内的污染扩散及分布主要受气象、建筑物、交通、绿化树等因素的综合影响。

道路上行驶的车辆排放形成了碳排放的线源,线源的中心线即道路中心线。交通源的影响特征主要由交通流的排放强度与排放位置决定。排放强度受交通流量、车速、车型分布、单车排放水平等因素决定,在扩散条件一定的情况下,排放强度直接决定着街道峡谷内的整体空气质量。机动车尾气的排放位置,直接与道路相关,车辆位置和车道位置决定了尾气的排放位置。由于街道峡谷内的风速与湍流分布不均匀,因此不同位置的污染物扩散能力差异较大,风速和湍流强度大的地方明显有利于污染物的稀释。

以下将分别针对城市开阔道路,城市交叉路口以及城市街道峡谷的交通碳排放扩散及分布规律进行建模分析。

6.2 城市开阔道路线源碳排放污染物扩散模式

对于城市开阔道路而言, 高斯线源模型是计算污染物扩散的常用模型。该模型假定道路上每一辆机动车作为排放点源, 其污染物扩散服从高斯扩散模式。高斯模式有四个假设条件: (1) 污染物在空气中服从高斯分布 (正态分布); (2) 在空中风速是均匀、稳定的, 且风速大于 1m/s; (3) 排放源强是连续均匀的; (4) 在扩散过程中污染物质量守恒。

道路污染源即道路上行驶的各类机动车, 其排放源强度计算公式如下:

$$Q_j = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot E_{ij}}{3600} \quad (6-1)$$

其中, Q_j 为 j 类碳排放物单位长度线源排放源强, $\text{mg}/(\text{s}\cdot\text{m})$; A_i 为 i 类车的小时交通量, 辆/h; E_{ij} 为运行工况下 i 类车 j 类碳排放物的排放因子。

根据线源排放源强, 利用高斯点源模型计算碳排放物扩散浓度。计算公式如下:

$$C_j = \frac{Q_j}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (6-2)$$

其中, C_j 为 j 类污染物在监测点的扩散浓度, mg/m^3 ; \bar{u} 为平均风速, m/s ; σ_y 、 σ_z 为污染物在 y 、 z 方向的扩散系数; y 为线源中心线至监测点的横风向距离, m ; z 为地面至监测点的距离, m 。

以高斯点源扩散模型为基础, 考虑风向与交通流线源的夹角等因素, 沿道路方向 (x 方向) 对碳排放物浓度分布模型进行积分, 从而得出道路交通线源的浓度分布模型。扩散模式如下:

$$C_{PR} = \frac{Q_j}{\bar{u}} \int_A^B \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} dl \quad (6-3)$$

其中, C_{PR} 为道路线源 AB 段对监测点 R 产生的污染物浓度, mg/m^3 ; h 为有效排放源高度, m ; A、B 为线源的起点及终点。

在城市道路中以直线道路为主, 平曲线段相对较少, 因此本研究主要考虑直线线源的排放情况。直线线源监测点至微元中点的 x 与 y 如图 6-1 所示, 计算公式如

下:

$$\begin{aligned} x &= L \cos \theta \\ y &= L \sin \theta - S / \cos \theta \end{aligned} \quad (6-4)$$

其中, x 为微元至监测点的下风向距离, m ; L 为微元至线源起点 A 的距离, m ; θ 为风向与线源的夹角, $0 < \theta < 90^\circ$; S 为监测点至微元切线的垂直距离, m 。

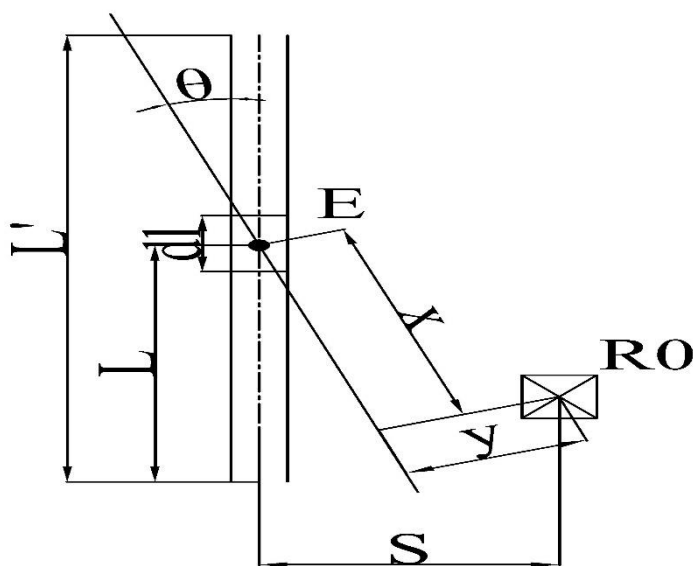


图6-1 道路线源污染物浓度扩散示意图

垂直扩散参数 σ_z 计算公式如下:

$$\sigma_z = (\sigma_{za}^2 + \sigma_{z0}^2)^{1/2} \quad (6-5)$$

$$\sigma_{za} = a(0.001x)^b \quad (6-6)$$

其中, σ_{za} 为常规垂直扩散系数; a 、 b 分别为回归系数和指数, 取值见表 6-1; σ_{z0} 为初始垂直扩散系数, 取值见表 6-2。

表6-1 垂直扩散系数回归系数和指数值

大气稳定度等级	a	b
不稳定	110.62	0.93198
中性	86.49	0.92332
稳定	61.14	0.91465

表6-2 初始垂直扩散系数

风速 \bar{u} (m/s)	<1	$1 \leq \bar{u} \leq 3$	>3
σ_{z0}	5	$5-3.5(\bar{u}-0.5)$	1.5

水平扩散参数 σ_y 计算公式如下:

$$\sigma_y = (\sigma_{ya}^2 + \sigma_{y0}^2)^{1/2} \tag{6-7}$$

$$\sigma_{ya} = 465.1 \times (0.001x) \tan \theta_p \tag{6-8}$$

$$\theta_p = c - d \times \ln(0.001x) \tag{6-9}$$

其中, σ_{ya} 为常规水平横风向扩散参数; σ_{y0} 为初始水平扩散参数, 取值见表 6-3; θ_p 为烟羽水平扩散半角; c、d 为回归系数, 取值见表 6-4。

表6-3 常规水平横风扩散系数

风速 \bar{u} (m/s)	<1	$1 \leq \bar{u} \leq 3$	>3
σ_{y0}	10	σ_{z0}	3

表6-4 水平扩散系数回归系数和指数值

大气稳定度等级	c	d
不稳定	18.33	1.8096
中性	14.33	1.7706
稳定	12.50	1.0857

利用高斯线源模型对上海市剑川路碳排放物扩散情况进行模拟, 模拟结果如表 6-5、表 6-6 所示。

表6-5 高斯线源模型碳排放扩散模拟情况 (实验一) (mg/m^3)

	监测点1		监测点2		监测点3	
	CO	CO2	CO	CO2	CO	CO2
实测均值	2.75	1054.29	2.38	1084.29	2.88	1092.86
模拟值	4.50	1263.98	4.12	1363.03	4.75	1435.29
绝对误差	1.75	209.69	1.74	278.74	1.87	342.43
相对误差%	63.64	19.89	73.11	25.71	64.93	31.33

表6-6 高斯线源模型碳排放扩散模拟情况（实验二）（ mg/m^3 ）

	监测点1		监测点2		监测点3	
	CO	CO ₂	CO	CO ₂	CO	CO ₂
实测均值	2.63	1037.14	2.50	1043.04	2.88	1056.78
模拟值	4.66	1229.54	4.47	1297.03	5.01	1321.13
绝对误差	2.03	192.40	1.97	253.99	2.13	264.35
相对误差%	77.19	18.55	7.80	24.35	73.96	25.01

对比结果可以看出，实测值与模拟值变化趋势相同，但普遍模拟值高于实测值。这是因为剑川路南侧为竹港河，北侧则为低层建筑，下垫面物理性质差异较大，容易形成局部大气流动，加速机动车污染物的扩散，所以实测均值相对于模拟值偏低。

6.3 城市交叉口扩散模式

交叉口在城市道路中分布众多，其地理方位、建筑布局等虽然有很多不同，但每个交叉口在机动车运行和排放上也有许多共同点。

从机动车行驶状，交叉口处车辆众多，车辆转弯和直行间的协调导致部分车辆的减速甚至怠速，机动车行驶状况复杂。这样车辆在交叉口处加、减速频繁，怠速时间也比正常行驶状况下高很多，其在交叉口处的尾气排放量势必会增加，造成的空气污染也更为严重。从建筑物布局来看，很多交叉口各支路两旁布满高低错落的建筑物，地形结构复杂，而处于这些建筑中的交叉口仿佛是一个“天井”，污染物扩散缓慢，容易发生污染事故。同时在有风条件下，气流团在各个方向建筑物间连续反射，随机形成不同方向的涡流，气流运动复杂，很难用一般数学模型模拟。

CALINE系列模式是美国国家环保局推荐使用的线源模型。与其他模式相比较，

CALINE 系列模式有适应面广、模式简单易操作等优点。CALINE4 模型为 CALINE 系列模型的最新版本，主要用于预测道路及交叉口一次性污染物的浓度，评估道路及交叉口两侧 150 m 范围内微尺度区域空气质量的变化以及模拟宽阔街道内污染物的浓度分布，确定相对不太复杂的地形条件下（道路的“平坦

段”、“路堤”、“桥梁”和“区段”等)多至 20 个接受点上的空气污染浓度。

CALINE4 模型同样基于高斯烟羽模型,结合污染物混合区概念计算线源对监测点污染物浓度的贡献,同时综合考虑了污染物沉积沉降速率对扩散的影响,能更好地适应交叉口区域的复杂环境。

CALINE4 模式输入文件主要由四部分构成,分别为模型运行控制选项、污染源数据、气象数据及接受点位置坐标文件。其中污染源数据文件中的数据信息应包括道路车流量数据、各类污染物的排放因子、道路几何参数(位置坐标、几何尺寸、路况类别等)。气象数据则主要包括风速、风向、大气稳定度、扩散参数等。利用 CALINE4 处理污染物扩散时,假定 1 小时内风是均匀而定常的,假定垂直风速等于零,扩散参数取用美国环保局给定的经验扩散参数,扩散方式包含初始水平、垂直扩散。

以上海市闵行区沪闵路-剑川路为研究对象,将组成交叉口的四条道路都划分成一系列长度不等的路段单元,路段单元划分方式如图 6-2 所示。根据车流方向和车道功能(左转、直行、右转),再考虑单个路段单元在多相位信号控制下排放源强空间分布的不均匀情况,将单个路段单元划分为进口道直行、左转、右转及出口道直行、左转、右转 6 个子片段。每个子片段含有一条或多条车道,单个子片段中车辆的运行特征具有一致性。片段划分如图 6-3 所示。

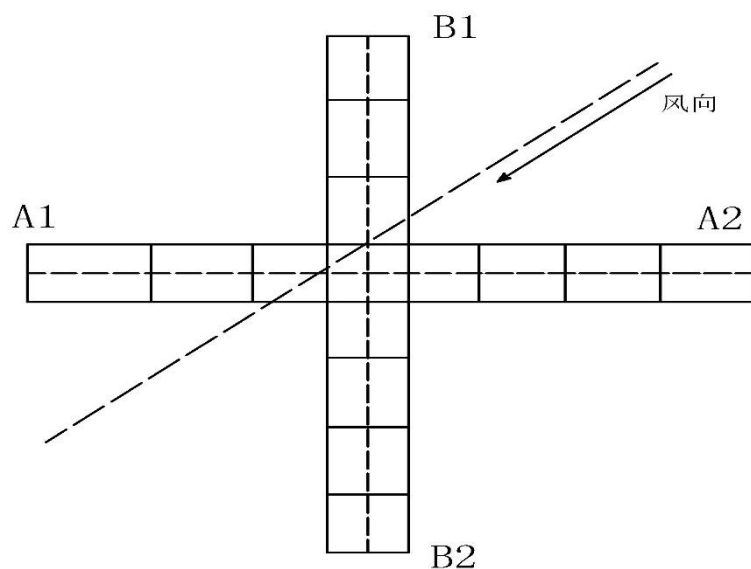


图6-2 交叉口路段单元划分

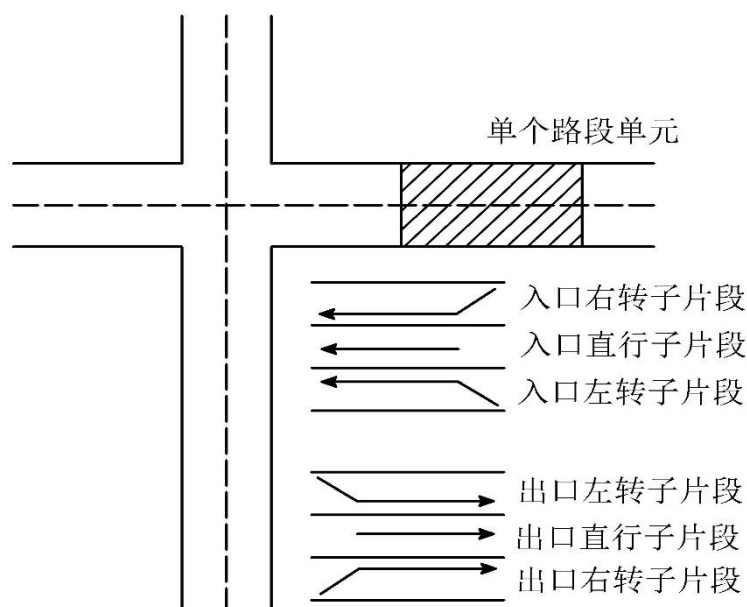


图6-3 路段单元子片段划分

考虑交通信号控制对单个子片段排放的影响，将机动车排放源强分为绿灯信号期排放源强和红灯信号期排放源强两类。绿灯排放源强指单个子片段内车辆一直处于有效绿灯时间状态下，每小时排放的污染物总质量。绿灯信号时长取有效绿灯时间，即绿灯时长及黄灯时长之和减去机动车启动损失时间。车辆在有效绿灯时间内以正常速度行驶，计算绿灯排放源强公式如下：

$$Q_g = N_l \times N_c \times q \quad (6-10)$$

$$q = E_v \times N_g \times \frac{L_s}{V} \times A \quad (6-11)$$

其中， Q_g 为绿灯排放源强， mg/h ； N_l 为每个子片段包含的车道数； N_c 为监测时间段所包含的信号周期数； q 为在一个信号周期内，一条车道中车辆的排放量总和， mg ； E_v 为机动车正常行驶时的排放因子， mg/s ； N_g 为绿灯信号期内计算车道车辆平均到达率， $\%$ ； L_s 为路段单元长度， m ； V 为平均车速， m/s ； A 为一条车道交通量， veh 。

红灯排放源强是指单个子片段内车辆一直处于非有效绿灯状态下，每小时排放污染物的总质量。红灯信号期是指一个信号周期内，除有效绿灯时间外的其余时间。在红灯信号期内，由于受交叉口信号控制的影响，车辆会出现减速停车和加速

过程。本研究参考污染物 CALINE4 扩散模型中的交叉口模块对单个子片段的红灯信号期排放源强进行模拟。假设每辆车的排放量由减速、怠速、加速三部分排放量总和构成，计算单个子片段每小时红灯排放源强公式如下：

$$Q_r = N_l \times N_c \times \sum_{i=1}^3 q_i \quad (6-12)$$

其中， Q_r 为红灯排放源强，mg/h； N_l 为子片段包含的车道数； N_c 为检测时间段所包含的信号周期数； q_i 为在一个信号周期中所有车辆第 i 种行驶状态（减速、怠速、加速）下的排放量总和，mg。

与绿灯信号期排放不同，红灯时间内单条车道内车辆排放量与车道所属路段单元位置关系密切。当所属路段单元靠近停车线，则车道内车辆的怠速排放量较高而加速排放较少；当所属路段单元靠近平均排队长度的末尾时，车辆排放情况正好相反。根据车流方向把交叉口分为相对四条道路连接（A1A2、A2A1、B1B2、B2B1）把每个路段单元包含的两条道路横截面作为路段单元的端点，每一个路段单元的端点与一条道路起点之间的距离称为起点距离 D （图 6-4）。依此可以计算每种累积扩散排放量将累积扩散排放量分为减速、怠速、加速累积扩散排放量三种类型。

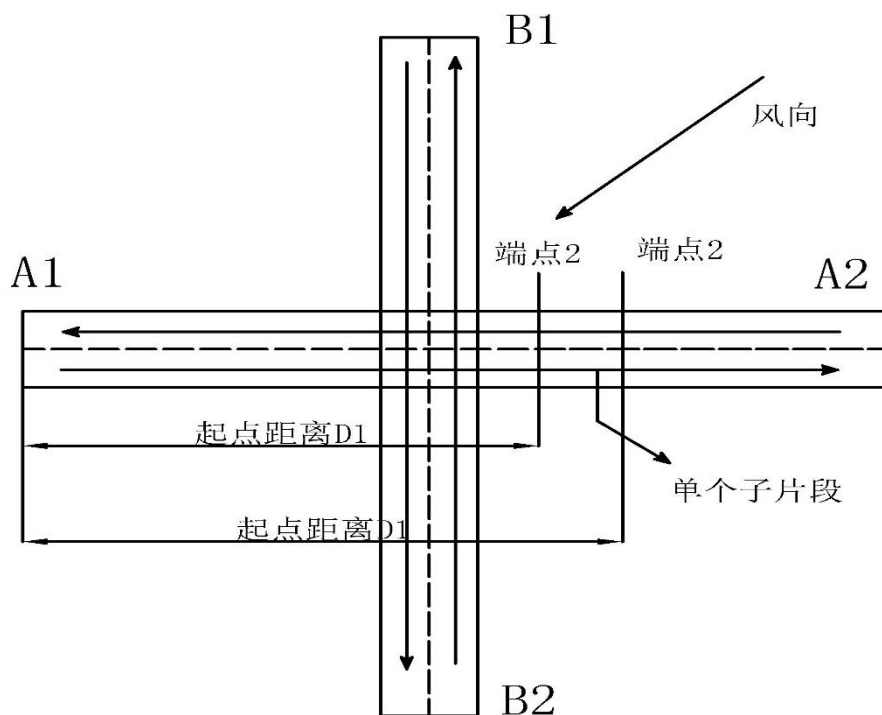


图6-4 红灯时间内排放源强计算示意图

加速累积扩散排放量表示计算车道在起点距离范围内所有车辆由于加速而产生的污染物排放量总和,计算方法为该车道在起点距离范围内所有机动车辆数、车辆加速度与加速排放率三者的乘积。当一个路段单元起点距离 D 确定后,加速累积扩散排放量根据车辆排队长度、停车线位置、加速时间不同而有不同的取值。根据路段单元端点位置不同,加速累积扩散排放量分以下两种情况。

(1) 当端点在车辆排队末尾之前(图 6-5),即起点距离包含在 a 区。则起点距离内的车辆未进入排队停车等候,因而没有加速过程,则加速累积扩散排放量为零。

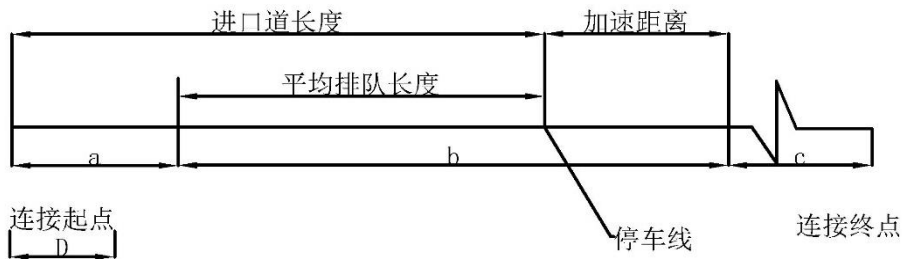


图6-5 机动车加速累积排放示意图(起点在a区域)

(2) 当端点在排队长度范围内(图 6-6),即起点落在 b 区,车辆经历怠速停车后加速行驶,加速累积扩散排放量等于加速排放率、排队车辆数与加速时间三者的乘积,计算公式如下:

$$q_a = E_a \times N_1 \times T_a \quad (6-13)$$

其中, q_a 为加速累积扩散排放量, mg ; E_a 为加速排放率(近似认为等于正常行驶排放率), mg/s ; N_1 为单车道加速车辆数, 辆; T_a 为车辆以平均加速度从速度为零加速至正常行驶速度所需时间, s 。

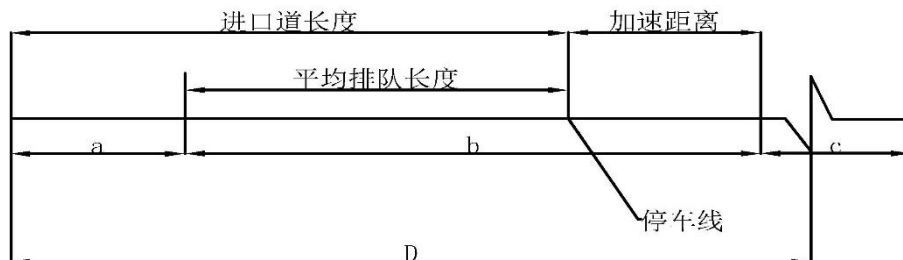


图6-6 机动车加速累积排放示意图(起点在b区域)

减速排放由于发生位置与加速排放相同,且排放速率近似,因此减速累积扩散排放量可近似看作与加速累积扩散排放量相同。

怠速累积扩散排放量计算方法与加速累积扩散排放量计算方法类似,等于怠速排放率、排队车辆数、平均怠速时间三者的乘积,平均怠速时间近似认为是红灯时间。怠速累积扩散排放量计算公式如下:

$$q_I = E_I \times N_2 \times T_R \quad (6-14)$$

其中, q_I 为怠速累积扩散排放量, mg; E_I 为怠速排放率, mg/s; N_2 为单车道加速车辆数, 辆; T_R 近似为红灯时间, s。

通过上述计算得到路段单元一个子片段的绿灯信号期排放源强和红灯信号期排放源强。该子片段包含车道的有效绿灯信号期为 T_{gi} , 以绿信比作为绿灯信号期排放源强的权重, 以 1 减去绿信比作为红灯信号期排放源强的权重, 对该子片段排放源强进行加权平均得到单个子片的平均排放源强。对同一个路段单元的 6 个子片段平均排放源强求和即为该路段单元的平均排放源强, 计算公式如下:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^6 [Q_{gi} \times \frac{T_{gi}}{T} + Q_{ri} \times (1 - \frac{T_{gi}}{T})] \quad (6-15)$$

其中, \bar{Q} 为单个路段单元平均排放源强, mg/h; T_{gi} 为一个子片段包含车道的有效绿灯信号时长, s; T 为信号周期时长, s; Q_{gi} 为绿灯排放源强, mg/h; Q_{ri} 为红灯排放源强, mg/h。

路段单元平均排放源强单位为 mg/h, 再除以路段单元长度与交叉口长度(或宽度)之和, 得到平均排放源强单位为 mg/(m·h)。

沪闵路-剑川路交叉口为信号控制交叉口。受交叉口信号控制的影响, 车辆通过交叉口时减速、加速、怠速和匀速等工况使污染物排放量明显增加。当处于有效绿灯信号期时, 通常视为车辆作匀速行驶。将其排放量看作匀速排放量。在非绿灯期车辆往往作变速运动或怠速停车, 存在由于车辆延误引起的附加排放量。交叉口污染物总排放量即为这两种排放量之和, 计算公式如下:

$$Q = Q_y + \Delta Q \quad (6-16)$$

其中, Q 为平面交叉口碳排放总量, g/h ; Q_y 为车辆匀速运动段的污染物排放量, g/h ; ΔQ 为延误附加排放量, g/h 。

在有效绿灯信号期, 车辆不停车通过交叉口可以近似认为作匀速运动, 车辆匀速运动段的污染物排放量计算公式如下:

$$Q_y = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^2 N_{zi} \times L_g \times E_i \quad (6-17)$$

其中, Q_y 为车辆匀速运动段的污染物排放量, g/h ; i 为车辆类型; N_{zi} 为进口道各车型交通量, veh/h ; L_g 为匀速运动段车辆驶过长度, 定义为进出口路段长 200 米与交叉口长度 (或宽度) 之和, m ; E_i 为第 i 种车型碳排放因子, g/km 。

由于沪闵路-剑川路交叉口在高峰时段交通量较大, 存在明显的延误情况, 因此必须考虑由交叉口延误带来的附加碳排放量。考虑交叉口存在的不同延误类型 (停车延误、引道延误等), 本研究中交叉口车辆由于延误引起的污染物附加排放量可近似看作由三部分组成: 停车至恢复到最初车速时的排放量 Q_s ; 车辆减速但不停车至恢复到最初车速时的排放量 Q_D ; 车辆怠速的排放量 Q_I 。附加排放量计算公式如下:

$$\Delta Q = Q_s + Q_D + Q_I \quad (6-18)$$

$$Q_s = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^2 N_{zi} \times m \times L_w \times E_{si} \quad (6-19)$$

$$Q_D = \frac{1}{3600 \times 1000} \sum_{i=1}^2 \frac{T_D \times N_{zi} \times L_g \times E_{si}}{T_0} \quad (6-20)$$

$$Q_I = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^2 N_{zi} \times T_s \times E_{di} \quad (6-21)$$

其中, ΔQ 为延误附加排放量, g/h ; Q_s 为停车至恢复到最初车速时的排放量, g/h ; Q_D 为车辆减速但不停车至恢复到最初车速时的排放量, g/h ; Q_I 为车辆怠速的排放量, g/h ; i 为车辆类型; N_{zi} 为进口道各车型交通量, veh/h ; m 为交叉口停车率, 对于信号控制交叉口取 0.4; L_w 为交叉口长度 (或宽度), m ; E_{si} 为车速变化时污染物附加排放量, 建议值为速度变化过程中平均速度所对应的排放因子, g/km ;

N_{zi} 为进口道各车型交通量, veh/h; L_g 为进出口路段长 200 米与交叉口长度 (或宽度) 之和, m; T_D 为减速延误时间, 计算时用进口延误时间减去排队延误时间, s; T_0 为每千米速度变化引起的时间延误, h; N_{Ii} 为进口车道各型车怠速停车数, 辆/h; T_s 为车辆的平均停车延误时间, s; E_{di} 为第 i 种车型每种污染物的怠速排放因子, g/(辆·h)。

选取 2015 年 3 月 9 日的交通、气象及排放监测数据, 利用 CLINE4 模型计算沪闵路-剑川路交叉口的碳排放扩散情况, 模型运行界面如图 6-7 所示。运行程序得到交叉口各测试点污染物 CO 排放源强和扩散浓度如表 6-7 所示。交叉口各进口各监测时段 CO 排放量如表 6-8、表 6-9、表 6-10 及表 6-11 所示。

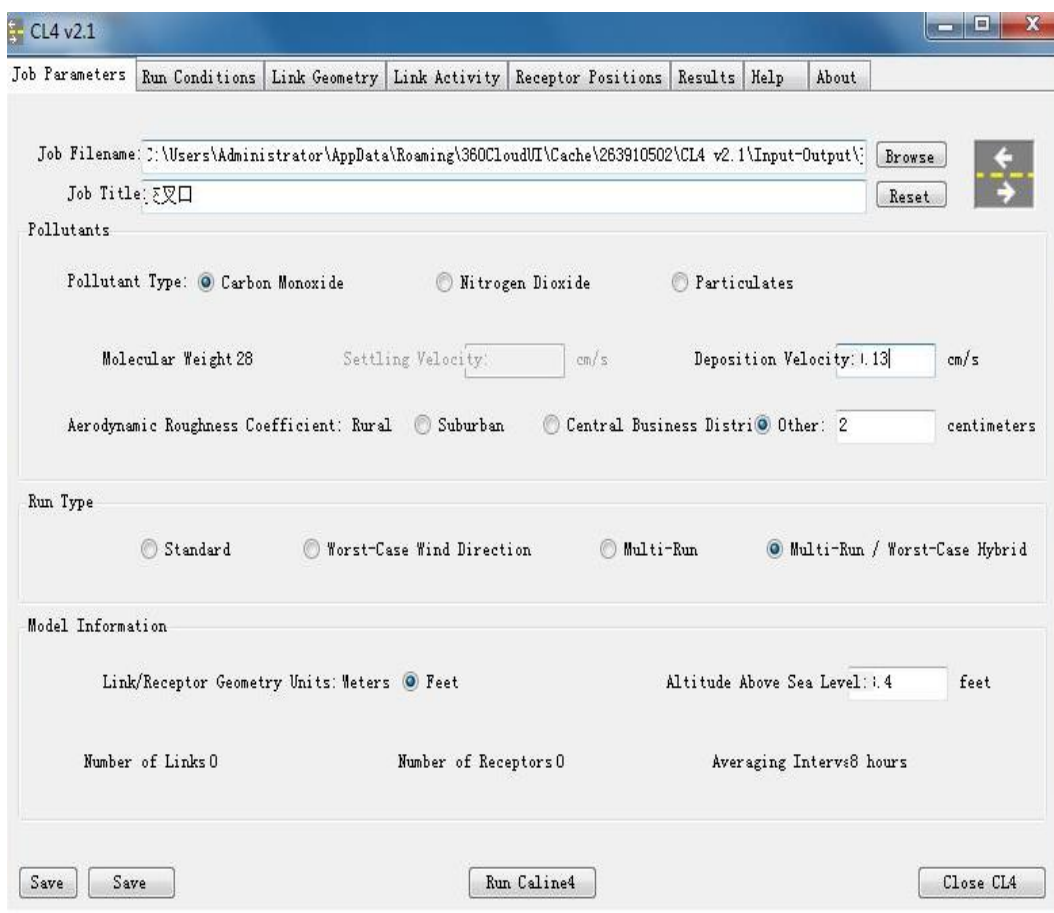


图6-7 CALINE4模型运行示意图

表6-7 沪闵路-剑川路交叉口测试点CO排放源强与模拟浓度

监测点	8:00-9:00		11:30-12:30		14:00-15:00		16:30-17:30	
	排放源强mg/h	扩散浓度mg/m ³	排放源强mg/h	扩散浓度mg/m ³	排放源强mg/h	扩散浓度mg/m ³	排放源强mg/h	扩散浓度mg/m ³
1	129.02	3.72	100.38	3.74	78.82	3.11	113.66	4.80
2	144.71	4.30	130.62	4.10	159.75	3.76	161.72	5.66
3	85.44	4.06	69.87	3.72	53.86	3.65	79.88	4.97
4	145.12	3.48	126.89	3.36	160.17	3.00	150.27	4.11

表6-8 沪闵路-剑川路交叉口东进口道CO排放量 (mg/m³)

行驶状态	8:00-9:00	11:30-12:30	14:00-15:00	16:30-17:30
匀速	9251	7931	6470	8672
怠速	3083	2634	1621	2937
停车-加速	817	747	630	790
减速不停车	22	17	7	18
合计	13173	11329	8728	12417

表6-9 沪闵路-剑川路交叉口西进口道CO排放量 (mg/m³)

行驶状态	8:00-9:00	11:30-12:30	14:00-15:00	16:30-17:30
匀速	5759	4530	3194	4795
怠速	2762	1975	1570	2347
停车-加速	508	602	666	582
减速不停车	14	11	8	10
合计	9043	7118	5438	7734

表6-10 沪闵路-剑川路交叉口南进口道CO排放量 (mg/m³)

行驶状态	8:00-9:00	11:30-12:30	14:00-15:00	16:30-17:30
匀速	12576	10361	7099	12081
怠速	3607	3319	2962	3601
停车-加速	819	609	537	732
减速不停车	12	11	10	12
合计	17014	14381	10608	16426

表6-11 沪闵路-剑川路交叉口北进口道CO排放量 (mg/m³)

行驶状态	8:00-9:00	11:30-12:30	14:00-15:00	16:30-17:30
匀速	10390	8712	6925	8071
怠速	3607	3458	3019	3512
停车-加速	430	390	333	401
减速不停车	9	10	10	10
合计	14436	12570	10287	11994

利用建立的交叉口污染物扩散模型模拟各测试点污染物浓度分布，将 CO 模拟结果与实地测试结果对比，如表 6-12 及图 6-8 所示。从表 6-12 和图 6-8 分析来看，实测值与模拟值变化趋势一致，但模拟值普遍稍高于实测值，模拟均值约为实测均值的 1.3 倍。分析产生误差原因如下：

(1) 模拟的交叉口比较宽阔，下风向建筑物比较低矮，交叉口四周较为开阔，局部大气流动较好，从而有利于机动车排放污染物的扩散。

(2) 模拟时近地面风速设为当日平均值，这与实际各时段风速有差异，造成模型计算值偏高。

(3) 实测车流量、车速、停车延误等由于数据采集方法上的局限性存在一定误差，对模型计算值也产生一定影响。

表6-12 CO实测值与模拟值对比 (mg/m³)

监测点	时段				
	8:00-9:00	11:30-12:30	14:00-15:00	16:30-17:30	
实 测	1	3.02	2.67	2.55	2.88
	2	2.83	2.61	1.96	3.23
	3	3.1	2.99	2.79	3.8
	4	3.8	3.01	2.86	3.09
	实测均值	3.19	2.82	2.54	3.26
模 拟	1	3.72	3.74	3.11	4.80
	2	4.30	4.10	3.76	5.66
	3	4.06	3.72	3.65	4.97
	4	3.48	3.36	3.00	4.11
	模拟均值	3.89	3.73	3.38	4.89

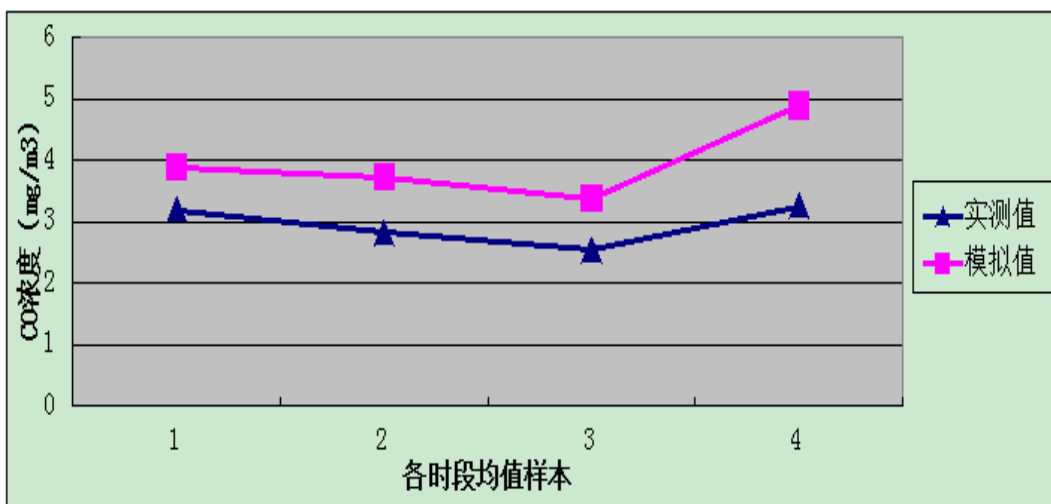


图6-8 CO浓度实测均值与模拟均值对比

利用表 6-8 至表 6-11 中数据，作交叉口各进口路段各时段污染物排放量对比分析见图 6-9。从中可得出沪闵路南进口路段 CO 排放量均高于其余进口路段排放量，沪闵路北进口排放量次之。剑川路西进口排放量最小。这是因为沪闵路作为闵行区的干线公路，车流量相较剑川路为高，尤其是车道设置与剑川路相同的沪闵路南侧路口，直行车流量为东西向的 2 倍有余。从排放污染角度考虑交通量越大，排放污染物总量越大，对交叉口空气质量造成一定影响。从四个时段看，早高峰期三种污染物的排放量均为最大，下午三种污染物的排放量均为最小，说明交通量是影响排放的重要因素。另外，早高峰期车辆怠速延误较大，对排放贡献率大。

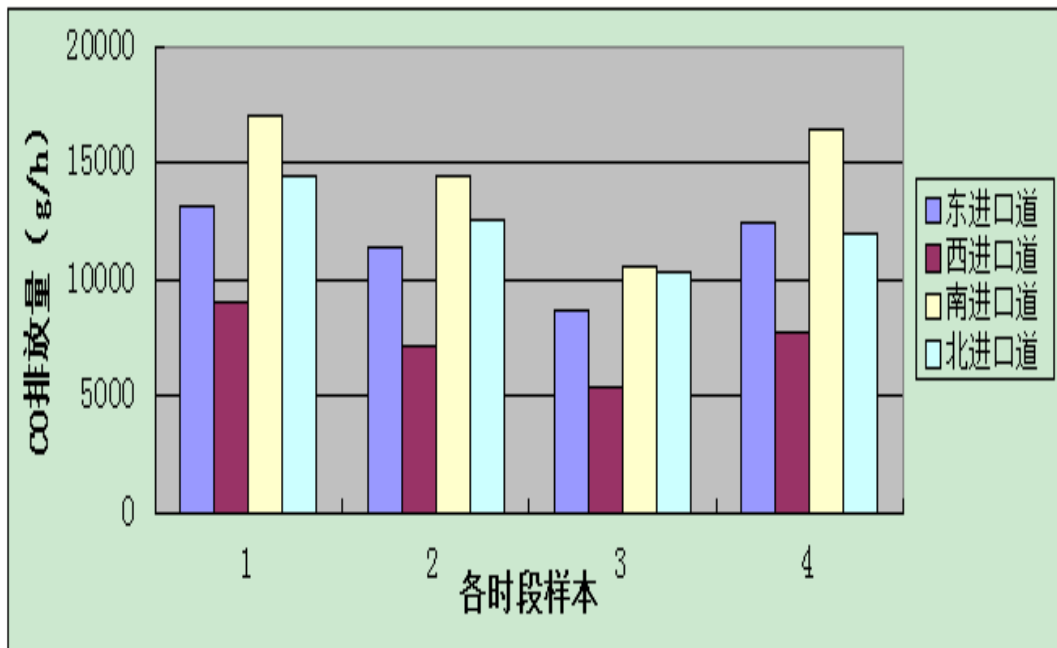


图6-9 交叉口各进口道CO排放量

上述分析中可以看出，控制交叉口机动车污染物排放总量重点在于减少交通量，即减少车辆的出行量。同时通过调整交叉口信号配时，减少机动车延误，从而减少机动车碳排放。

6.4 城市街道峡谷扩散模式

如前文所述，街道峡谷内污染物浓度水平主要由三个因素决定，即排放源、气象条件和街道两侧建筑物的几何特征。其中，气象条件（主要指屋顶上方的风及湍流）及建筑物的几何特征（宽高比等）已得到较为广泛的研究，但排放源对街道峡谷内污染物浓度分布影响的研究还较为少见。机动车尾气排放主要从两方面影响街道峡谷内局部空气质量，一是机动车尾气排放的增加直接导致局部相关污染物浓度上升；二是不同位置车道排放尾气对污染物浓度空间分布特征有直接的影响。

目前，国内外学者探索街道峡谷问题时，主要采用均匀排放的单车道假设进行气象条件和街道几何等因素的影响规律研究，并取得了一系列的重要成果。但实际上街道峡谷内车道数往往不只一条，因此针对多车道街道峡谷不同位置车道排放尾气扩散规律的研究，分析车道设置对建筑物侧面及人行道尾气污染影响特征，对局部空气质量评估及降低居民暴露水平具有一定参考价值。

根据城市街道峡谷区域气象、地形及建筑环境复杂的特点,本研究采用 AERMOD 模型对该区域的碳排放扩散分布情况进行模拟与分析。AERMOD 模型是稳态烟羽模型,它以扩散统计理论为出发点,假设污染物的浓度分布在一定程度上服从高斯分布。AERMOD 模型系统的结构包括三个独立的部分: AERMOD (扩散模型)、AERMET (气象数据预处理器) 和 AERMAP (地形数据预处理器),可基于大气边界层数据特征模拟点源、面源、体源等排放出的污染物在短期(小时平均、日平均)、长期(年平均)的浓度分布,适用于城市 CBD 区域复杂地形的染污分布模拟。AERMOD 模型运行的参数主要包括污染源数据、气象数据、地形数据等。本研究主要考虑道路线源的碳排放情况,污染源数据包括污染物排放强度和排放速率,污染物选择在复杂湍流中较为稳定的 CO,环境空气功能分区选择二类区,并考虑建筑物下洗。气象数据包括地面气象数据及探空数据,其中地面气象数据主要包括风向、风速、总云、低云、干球温度等参数,探空数据主要包括气压、离地高度、干球温度、露点温度、风向、风速等参数。本研究中气象数据选取距离研究靶区最近的上海虹桥气象站的观测数据,利用 AERMET 进行数据预处理。地形数据主要为评价区域内网格点或任意点的地理坐标及 DEM 文件。本研究选取徐家汇区域的卫星地图及地形文件,利用 AERMAP 进行地形预处理。输出结果包括典型小时、典型日及长期气象条件下,项目对环境空气敏感区和评价范围内的最大环境影响,分析是否超标、超标程度、超标位置,并绘制评价范围内区域小时平均浓度最大值时所对应的浓度等值线分布图。

研究选取上海市徐家汇 CBD 区域的街道为研究对象,该区域为典型城市 CBD,区域内有衡山路、华山路、肇嘉浜路等多条城市主干道,路网密集,交通量较大。道路两侧建筑物密集,并有港汇恒隆广场、太平洋百货、上海实业大厦等多幢高层建筑,具有明显的城市街道峡谷效应,适宜利用 AREOMOD 模拟交通碳排放分布情况。研究利用 AEROMOD 模拟道路线源 CO 排放分布情况。首先导入区域的卫星地图,并绘制主干道道路线源及区域周边主要建筑物轮廓,设定建筑物楼高,如图 6-10 所示。

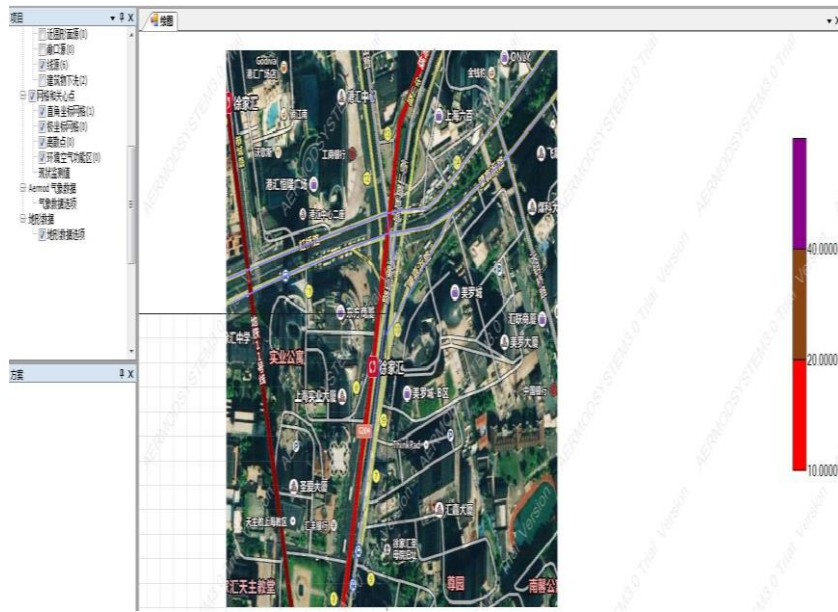


图 6-10 徐家汇 CBD 区域路网及建筑物

其次，选取上海市 2015 年 1 月至 3 月的气象数据，利用 AERMET 进行气象预处理（图 6-11a）。选取以区域内衡山路-华山路交叉口为中心，半径 500m 区域，加载该区域的地形数据，利用 AERMAP 进行地形预处理（图 6-11b）。基于实测的交通流数据，结合第五章 5.3 节所得排放因子，计算道路线源排放源强（图 6-11c）。

高空气象数据

导入数据(E) 开始时间: 2015年01月01日 经度: 121.47 站号: 00058382 速度选项: 0
 导出数据(E) 结束时间: 2015年03月03日 纬度: 31.4 时间间隔: 0 地面高程(m): 4

序号	日期	时间	层数	风速/风向	气压 (hPa)	高度(m)	干球温度(C)	露点温度(C)	风向(度)	风速(m/s)
97	2015-02-17	23:41	双击查看		1034	0	-1.1	-12.1	270	3
98	2015-02-18	11:29	双击查看		1000	268	-1.3	-13.3	325	9
99	2015-02-18	23:37	双击查看		925	883	-6.7	-24.7	340	14
100	2015-02-19	11:31	双击查看		858	1465	-9.1	-29.1		
101	2015-02-19	23:45	双击查看		850	1539	-8.9	-28.9	330	20
102	2015-02-20	11:33	双击查看		780	2204	-7.7	-32.7		
103	2015-02-20	23:37	双击查看		765	2395	-5.5	-30.5		
104	2015-02-21	11:37	双击查看		700	3050	-8.1	-32.1	315	30
105	2015-02-21	23:43	双击查看		664	3459	-7.9	-33.9		
106	2015-02-22	11:56	双击查看		566	4679	-15.1	-40.1		
107	2015-02-22	23:49	双击查看		508	5492	-16.1	-40.1		
108	2015-02-23	11:44	双击查看		500	5616	-17.1	-40.1	290	49
109	2015-02-23	23:46	双击查看		400	7256	-29.1	-48.1	280	59
110	2015-02-24	11:46	双击查看		363	7940	-34.5	-52.5	275	62
111	2015-02-24	23:33	双击查看		337	8472	-31.5	-51.5		
112	2015-02-25	11:35	双击查看		300	9286	-33.3	-53.3	275	62
113	2015-02-25	23:48	双击查看		270	10022	-35.5	-54.5		
114	2015-02-26	11:45	双击查看		250	10546	-39.9	-58.9	280	69
115	2015-02-26	23:39	双击查看		250	10546			280	69
116	2015-02-27	11:42	双击查看		200	12036	-51.3	-68.3	275	86
117	2015-02-27	23:45	双击查看		186	12505	-52.5	-69.5		
118	2015-02-28	11:40	双击查看		150	13856	-62.1	-78.1	265	78
119	2015-02-28	23:54	双击查看		128	14819	-68.3			
120	2015-03-01	11:45	双击查看		128	14819	-68.3		265	74
121	2015-03-01	23:44	双击查看		108	15845	-64.5			
122	2015-03-02	11:50	双击查看		100	16326	-66.9		270	51
123	2015-03-02	23:49	双击查看		89.9	16963	-69.5			
124	2015-03-03	11:46	双击查看		70	18476	-64.7		255	26

就绪...

AermodSystem-地形预处理-AermapSystem

导入地形数据
 自动导入 导入地形数据(A)
 输入地理坐标
 地理坐标
 经纬度坐标 度分秒
 高程: 121.45
 经度: 31.16
 数据格式: 文本数据
 高程数据文件列表
 高程数据源范围
 西南角 UTM 坐标: X[m]: 345397 Y[m]: 385530
 东北角 UTM 坐标: X[m]: 3441498 Y[m]: 3460841
 地形数据加载完成

(a) 气象数据

(b) 地形数据



(c) 排放源数据

图 6-11 气象、地形及排放数据预处理

最后,将交叉口中点设为关心点,半径 150m 范围为关心区域,利用 AEROMOD 计算徐家汇 CBD 区域交通 CO 排放的扩散情况,CO 浓度分布等值线图如图 6-12 所示。关心区域内距关心点不同距离及不同方位的 CO 浓度变化如表 6-13 所示。

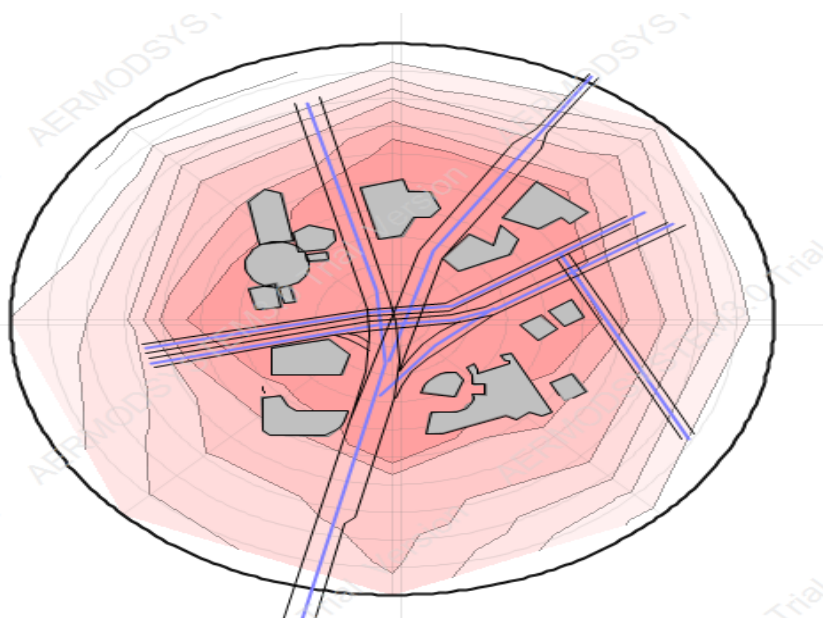


图6-12 徐家汇CBD区域CO浓度分布情况

表 6-13 关心区域不同方向及位置 CO 分布情况 (mg/m³)

距圆心 距离 方位角	30m	60m	90m	120m	150m
0°	7.17	7.29	7.47	5.70	4.37
45°	9.29	4.97	3.34	2.53	2.02
90°	9.17	6.57	3.69	2.54	2.80
135°	9.24	4.81	3.00	2.14	1.63
180°	7.70	7.24	7.16	7.60	6.66
225°	3.99	0.66	0.32	0.12	1.52
270°	3.59	2.42	1.35	0.67	1.22
315°	4.91	0.36	0.14	0.45	1.08

6.5 本章小结

本章首先分析影响碳排放物扩散的主要因素及其影响机理, 得出气象条件、地形及交通流是影响城市交通碳排放扩散分布的主要因素。根据各因素对碳排放扩散的作用机制, 分别选取城市开阔道路、城市交叉口及城市街道峡谷为研究靶区, 建立相应分布模型并分析该区域交通碳排放分布规律。对于城市开阔道路主要考虑风速、风向及排放源的影响作用, 以上海市剑川路为研究对象, 利用高斯线源模型进行碳排放分布建模。对于城市交叉口进一步考虑信号控制对机动车碳排放的影响, 以上海市沪闵路-剑川路为研究对象, 利用 CALINE4 模型进行建模。对于城市街道峡谷则全面考虑了地形、建筑物排布及高度及区域路网的对碳排放分布影响, 利用 AEROMOD 模型进行建模。所建立的模型均能较好反映碳排放在不同因素作用下的浓度分布情况, 能充分描述城市交通碳排放分布规律。

第七章 低碳视域下的城市交通发展战略与供给侧对策

面对城市发展带来的建成区面积扩张,机动车化水平不断提高等问题,城市交通系统承受着巨大的碳减排压力。因此,保持城市交通低碳发展需要从多方面、不同层次、不同利益群体的共同努力。本章内容以上海城市交通系统为研究对象,通过对上海未来交通碳排放情况的预测,从宏观交通政策、中观理论方法、微观技术手段三个层次,提出低碳视域下的城市交通发展战略。从供给侧的角度,基于碳排放的形成机理,以减少交通碳排放为指标重新考察传统交通规划与管理方式,有针对性地提出低碳导向的交通供给侧对策。

7.1 上海未来交通碳排放情况预测

对上海城市未来交通碳排放状况的预测分析,主要采用情景分析法。将未来上海城市交通碳排放状况,根据城市、产业发展方针政策,能源技术等因素分为三个情景——转型情景、弱干预情景以及强干预情景。转型情景下的交通碳排放预测反映上海在目前发展趋势及减排力度上,保持现有政策继续发展低碳交通情景下的碳排放状况。弱干预情景反映了上海交通运输部门政策调整力度不大,但能源技术进步较快情景下碳排放状况。而强干预情景反映了上海交通运输业向低碳化加速调整,同时能源技术有较大提高时的碳排放状况。通过对上述三种情景分析,对上海城市未来交通碳排放状况有相对客观和全面的预期。

情景分析包括客运及货运两个交通部门。城市货运交通部门的碳排放机制及统计口径较为一致,本课题采用统一方法对货运量、周转量、能耗及碳排放四个指标进行预测。利用上海市工业能源交通统计年鉴数据,对未来货运总量进行预测,同时根据产业及货运发展规划预测目标年不同货运部门的货运量。并与货运总量对比核实后,通过货物平均运送距离估算目标年限的货运周转量,乘以其能耗特征参数计算目标年限的能耗总量。城市客运交通部门中不同交通方式的排放机制不同,在情景分析中对居民出行分以下四种方式进行测算:小汽车(包括私人汽车、公务车辆、其它社会车辆等)、公共汽车、轨道交通和出租汽车。对于小汽车出行,利用上海市统计年鉴数据,按照三种不同情境进行上海市人均 GDP 与小汽车千人保有率回归并计算车均年出行总里程,通过能耗参数计算总油耗。

对于公共汽车、轨道交通、出租车三类公共交通出行，以上海城市公共交通发展战略规划、上海市“十二五”规划等为依据，计算不同情景下公共交通出行所占客运人数。同时，对公共交通年载客量/年运营里程这一服务效率指标进行回归分析，根据年载客量计算运营里程，最后利用公式 4-2 计算能源消耗及碳排放量。上海市交通运输业现状数据如表 7-1、表 7-2 所示。

表 7-1 上海市货运交通部门发展现状

年份	国内生产总值(亿元)	公路货运量($\times 10^4$ t)	货运周转量($\times 10^8$ t·km)
2003	6694	30678	69
2004	8072	31554	71
2005	9247	32684	73
2006	10572	33799	80
2007	12494	35634	85
2008	14069	40328	253
2009	15046	37745	244
2010	17165	40890	266
2011	19195	42685	284
2012	20181	42911	288
2013	21602	43809	299

表 7-2 上海市客运交通部门发展现状

年份	小汽车($\times 10^4$ 辆)	出租车($\times 10^8$ 人次)	出租车($\times 10^8$ km)	轨道交通($\times 10^8$ 人次)	轨道交通($\times 10^8$ km)	公共汽车($\times 10^8$ 人次)	公共汽车($\times 10^8$ km)
2003	36.16	9.95	56.45	4.06	0.08	27.31	10.8
2004	44.60	10.92	57.90	4.80	0.10	28.38	11.41
2005	53.59	11.28	58.12	5.94	0.11	27.81	11.30
2006	62.81	11.78	61.05	6.56	0.15	27.40	11.28
2007	72.81	11.55	60.66	8.14	0.17	26.50	11.32
2008	82.96	12.32	63.18	11.28	0.25	26.60	11.90
2009	95.10	12.29	62.89	12.45	0.29	27.13	11.81
2010	111.52	12.23	63.68	15.93	0.32	27.67	11.76
2011	98.87	11.36	64.02	18.83	0.40	28.11	11.72
2012	114.58	11.74	64.87	22.73	0.45	27.96	11.66
2013	130.46	10.76	65.42	25.26	0.51	27.08	11.67

(1) 转型情景。在转型情景下，货运平均运送距离将保持在 23km/t 水平，单位作业能耗将逐渐下降至 65t 标准煤/ $\times 10^6$ t·km。小汽车千人拥有率按照 Logit 函数

S 型曲线增长, 在 2020 年达到 220 辆/10³ 人, 2050 年达到 315 辆/10³ 人; 小汽车年均出行长度将从目前的 13700km/车逐渐下降至 10000km/车; 百公里油耗保持在 8.8L 左右的水平。上海市居民人均日出行次数将逐渐增长到远期的 2.8 次/日, 公交出行(包括公共汽车、轨道交通和出租车)比例维持在 30%。公共汽车占公共交通比例将下降至 40% 以下, 年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = -0.068x + 2.851$ ($R^2=0.959$), 服务效率指标——年载客量/年运营里程, 逐渐下降至 2.2 人次/km, 百公里油耗下降至 40L 的水平。轨道交通占公共交通的比例逐渐升高至 40%, 年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = 2.285x - 1.216$ ($R^2=0.984$), 百公里能耗维持在 263.9kw/h 左右。出租车年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = 3.358x + 21.54$ ($R^2=0.986$), 百公里油耗维持在 10L 左右。转型情景上海市交通部门能耗及碳排放情况如表 7-3 所示。

表 7-3 转型情景上海市交通部门能耗及碳排放情况 (2010-2050)

年份	客运能耗 ($\times 10^4$ t 标煤)	客运碳排放 ($\times 10^4$ t)	货运能耗 ($\times 10^4$ 标煤)	货运碳排放 ($\times 10^4$ t)
2010	274.30	713.18	88.98	231.35
2015	470.07	1222.18	111.07	288.78
2020	786.50	2044.90	134.66	350.12
2030	1070.15	2782.39	172.24	447.82
2050	1219.03	3169.48	218.85	569.01

(2) 弱干预情景。在弱干预情景下, 货运平均运送距离将保持在 23km/t 的水平, 单位作业能耗将逐渐下降至 55t 标准煤/10⁶t·km。小汽车千人拥有率按照 Logit 函数 S 型曲线增长, 在 2020 年达到 180 辆/10³ 人, 2050 年达到 240 辆/10³ 人; 小汽车年均出行长度将从目前的 13700km/车逐渐下降至 9500km/车; 百公里油耗下降到 6.5L 的水平。上海市居民人均日出行次数将逐渐增长到远期的 2.8 次/日, 公交出行(包括公共汽车、轨道交通和出租车)比例逐渐升高到 35%。公共汽车占公共交通的比例将下降至远期的 40% 以下, 年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = -0.068x + 2.851$ ($R^2=0.959$), 服务效率指标——年载客量/年运营里程逐渐下降至 2.2 人次/km, 百公里油耗下降至 30L 的水平。轨道交通占公共交通的比例逐渐升高至 50%, 年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = 2.285x - 1.216$ ($R^2=0.984$), 百公里能耗维持在 263.9kw/h 左右。出租车年载客量 x 与年运营里

程线 y 性回归方程为: $y = 3.358x + 21.54$ ($R^2=0.986$), 百公里油耗下降至 7.5L 左右。转型情景上海市交通部门能耗及碳排放情况如表 7-4 所示。

表 7-4 弱干预情景上海市交通部门能耗及碳排放情况 (2010-2050)

年份	客运能耗 ($\times 10^4$ 标煤)	客运碳排放 ($\times 10^4$ t)	货运能耗 ($\times 10^4$ 标煤)	货运碳排放 ($\times 10^4$ t)
2010	260.17	676.44	86.87	225.82
2015	378.77	984.80	103.24	268.42
2020	540.93	1406.42	120.92	314.39
2030	635.55	1652.43	145.34	377.88
2050	640.49	1665.27	170.68	443.77

(3) 强干预情景。在强干预情景下, 货运平均运送距离将保持在 23km/t 的水平, 单位作业能耗将逐渐下降至 55t 标准煤/ 10^6 t·km。小汽车的千人拥有率按照 Logit 函数 S 型曲线增长, 在 2020 年达到 130 辆/ 10^3 人, 2050 年达到 170 辆/ 10^3 人; 小汽车年均出行长度将从目前的 13700km/车逐渐下降至 8500km/车; 百公里油耗下降到 6.5L 的水平。上海市居民人均日出行次数将逐渐增长到远期的 2.8 次/日, 公交出行 (包括公共汽车、轨道交通和出租车) 比例逐渐升高到 35%。公共汽车占公共交通的比例将下降至远期的 30%, 年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = -0.068x + 2.851$ ($R^2=0.959$), 服务效率指标——年载客量/年运营里程逐渐下降至 2.2 人次/km, 百公里油耗下降至 25L 的水平。轨道交通占公共交通的比例逐渐升高至 70%, 年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = 2.285x - 1.216$ ($R^2=0.984$), 百公里能耗维持在 263.9kw/h 左右。出租车年载客量 x 与年运营里程线 y 性回归方程为: $y = 3.358x + 21.54$ ($R^2=0.986$), 百公里油耗下降至 6.0L 左右。转型情景上海市交通部门能耗及碳排放情况如表 7-5 所示。

表 7-5 强干预情景上海市交通部门能耗及碳排放情况 (2010-2050)

年份	客运能耗 ($\times 10^4$ 标煤)	客运碳排放 ($\times 10^4$ t)	货运能耗 ($\times 10^4$ 标煤)	货运碳排放 ($\times 10^4$ t)
2010	252.73	657.10	87.27	226.90
2015	329.03	855.48	104.31	271.21
2020	401.58	1044.11	122.39	318.21
2030	434.14	1128.76	150.07	390.18
2050	370.11	962.29	162.15	421.59

通过上述情景分析可以看出，通过引导交通客货运部门产业结构向低碳化转型，同时加快能源技术革新能有效降低城市交通碳排放量。对比三种情景下远期碳减排效益，可以看出在强干预情景下，到 2050 年上海客运交通碳排放总量比转型情景和弱干预情景分别减少 70% 和 42%，货运交通碳排放分别减少 26% 和 5%，碳减排效益明显。在资源与环境双重约束下，通过交通政策、城市规划和能源技术等多层面的推动上海未来低碳交通转型，具有重要战略性和引领性意义。

7.2 低碳交通供给侧对策及建议

7.2.1 发展政策

随着长三角城市化的进一步推进与深化，家庭年收入、私家车拥有量和人口规模在近期内将继续呈上升趋势，进而加剧城市居民出行碳排放强度和区域碳排放总量增长。而上海作为长三角中心城市，未来将承受更多由客货运量增长、居民出行量增加和机动车保有量增长带来的碳排放压力。因此，建议从以下三方面采取切实有效的调控对策，以控制或降低城市居民出行交通碳排放。

(1) 采用差别化的行政干预手段和经济杠杆调控家庭小汽车保有量增长速度。行政干预手段包括实施单双号限行、限购、摇号上牌、牌照拍卖等政策，有效控制家庭汽车保有量的过快增长速度。目前，上海市实行的机动车牌照拍卖制度在一定程度上抑制了机动车保有量的过快增长。未来一段时间，上海还需要继续实行相应弹性限牌政策，通过定期市场调研调节政策弹性，避免长期高压限牌政策对家庭汽车刚性需求及汽车工业的抑制作用。同时，与机动车报废制度协调联动，加速环保不达标车辆的报废速度，使机动车保有量能稳定在合理水平。经济杠杆调控手段包括实施差别化的消费税和购置税、开征环境污染税、拥堵收费等，提高家庭小汽车购买与使用成本，整体上抑制家庭小汽车需求过快增长。上海可借鉴伦敦、新加坡等城市拥堵收费及机动车购置税政策，研究与上海交通特征相适应的经济政策，并进行多轮听证，推动政策有效落实。同时，鼓励小排量汽车和清洁能源汽车消费，抑制大排量汽车消费，调控小汽车保有量中不同类型的比例结构，兼顾汽车产业发展、家庭刚性需求与节能减排需求之间的平衡。

(2) 政府部门进一步优化城市功能规划格局。通过在城市规划中贯彻多中心空间布局,鼓励土地多种用途综合开发,注重土地、建筑的多功能混合使用,进行公共交通导向性土地开发等,形成交通友好型的城市土地利用结构,使人们能够以更短时间、近距离地到达工作和购物等地点,减少交通出行需求。相对国内其他城市,上海已经基本上构建了较为完善的以公共交通为主体的综合运输体系,其中公共交通包括地面公交、地铁、轻轨、出租车、磁悬浮、轮渡等。因此,可以在上海市的中心城区试点建设以公共交通为主的低碳交通区。

(3) 加强节能减排与低碳意识宣传,鼓励与引导居民公共交通出行,减少选择小汽车消费,鼓励拼车出行等。通过政府层面的引导宣传,加强城市居民对低碳交通概念的理解,鼓励居民采取公交出行、小汽车合乘、“P+R”(Park and Ride)模式,全面构建居民低碳出行理念,保证低碳交通政策的进一步推广。

7.2.2 发展理论方法

城市低碳交通发展理论,主要从城市规划建设角度,协调城市交通与其他活动,控制城市无序蔓延。形成低碳城市空间结构是绿色交通的基础,控制城市无需蔓延是减少城市交通碳排放的有力手段。规划中应通过协调土地与交通,保证城市交通与其他活动之间的互相促进,共同发展。针对目前上海城市交通发展状况,未来的城市建设首先要有利于步行和自行车等慢行交通的发展,大力发展公共交通网络,如发展高性价比的快速公交和地铁等,同时减少郊区小汽车出行比例。城市空间规划首先应考虑以良好步行环境为导向的开发,其次考虑方便自行车使用为导向的开发建设;在充分构建慢行交通体系的基础上倡导以公共交通为导向的开发建设,打造公交都市;最后,考虑城市形象改善工程和小汽车交通的发展。将原先由碳排放强度高的交通方式承担的交通量转移到碳排放强度低的交通方式上,从而实现在货物、乘客运输量相同的前提下,减少碳排放的目的在构建低碳城市空间时应注意以下两方面:

(1) 土地利用与交通耦合发展。交通规划要从单一模式向多模式相互支撑的交通体系转变,多模式交通与土地利用是一个整体,应与不同层面城市发展目标相结合。在区域层面上,城镇体系规划应与区域性公共交通体系结合,建立区域性公共交通发展走廊。在城市规划中贯彻多中心空间布局,鼓励土地多种用途

综合开发，注重土地、建筑的多功能混合使用，进行公共交通导向性土地开发等，形成交通友好型的城市土地利用结构，使人们能够以更短时间、近距离地到达工作和购物等地点，减少交通出行需求。地块开发时，其强度应取决于公共交通可达性，城市应鼓励采用集约化的土地开发模式，强调城市工作与居住的平衡，每一个地块的开发都需要强制制定用地与交通的整合规划。通过土地利用与交通耦合才能在未来有效控制无序出行，降低交通能源消耗和碳排放量。

(2) 城市结构与出行方式选择。城市空间结构的理论依据应当从中心地理论转向多级网络嵌套的理论模式，把高效交通与多中心城市发展结合起来。大型公共设施建设要与公交枢纽建设相结合，有效减少城市日常出行距离，从而减少城市能源消耗及碳排放。

(3) 改善城市慢行空间，增加同时间、同距离下人们出行选择慢行交通的可能性。

(4) 将低碳交通规划贯穿于新城区的各领域。新城区各交通要素应符合低碳交通要求，城市化过程中，城市交通排放问题不随之扩大，而低碳交通体系却随之延伸。

7.2.3 发展技术手段

低碳交通发展技术手段，主要包括新能源技术、机动车节能技术、道路技术及智能交通技术四方面。

新能源汽车是未来发展的趋势，既可以减少对化石能源的依赖，还能减少汽车尾气的排放。目前新能源汽车主要包括纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车及天然气汽车等。新能源汽车的发展路径应当是：多种新能源汽车技术并进，在未来碳捕获与封存技术或者新能源发电技术成熟时，大力推广纯电动汽车的市场化应用。在现阶段，政府应当充分评估各类新能源汽车的碳排放效益、能源经济性以及技术水平，选择适合本地交通特点及能源生产状况的新能源汽车类型进行试点推广。同时，政府也应通过标准、财税等政策推广节能低碳交通工具的应用。

机动车节能技术旨在改善原有交通工具的能耗和排放水平，减少交通工具单

位行驶里程的碳排放量，从而实现在同样交通方式、同样交通出行距离的前提下，减少碳排放量的效果。通过绿色驾驶技术（Eco drive）、车身轻量化技术、发动机运行节能技术（可变气门技术、缸内直喷技术等）等一系列节能技术，能有效提高燃油经济性，降低碳排放量。更重要的是，机动车节能技术升级与尾气排放标准的提高相结合，能使汽车产业保持节能、低碳发展的良性循环。目前，许多国家发布了关于汽车能耗与尾气排放的新国家标准。以日本为例，日本政府自 1999 年开始推行“领跑者制度（Top-Runner）”，即根据当前市场上汽车厂商中车辆燃油经济性能最佳公司的绩效，并考虑未来技术进步因素，设定比该最佳燃油经济性绩效更高的标准，推动厂商提高汽车燃油经济性和排放标准。排放标准的提高又将推动厂商不断研发新技术，促进整个汽车产业链技术升级。

道路技术主要包括慢行交通通道的打造及公交专用道设置两方面。慢行交通是一种可持续发展的绿色低碳交通，不仅可以缓解交通拥堵，降低环境污染，还可以促进资源合理利用。慢行交通道路主要设计技术包括：（1）在道路上设置至少 3 米宽的自行车车道，并在楼宇、道路和车站附近提供安全的自行车停放处；（2）在城市市区中建立慢行专用网道，并保证两条慢行专用道路间隔不超过 800 米，赋予慢行交通充分路权。同时，结合相应的景观设计提升慢行交通环境，吸引居民采用慢行交通方式出行，将其打造为城市名片。公交专用道作为公交优先战略的重要环节，能给予公共交通充分的路权保障，保证公交顺畅运营。同时，公交专用道能有效提高公共交通服务水平，增强公交出行吸引力，有助于提高居民公交出行比例。

交通的智能化、信息化也是改善策略的重要内容。车辆在拥挤状态中排放的二氧化碳要远高于高速行驶中二氧化碳排放量。通过广泛应用智能交通系统（ITS）提高道路使用效率，通过采用车辆信息交通系统（VICS）、电子收费系统（ETC）等智能交通技术，可实现提高车辆行驶速度，缓解城市交通拥挤，进而提高燃油效率，实现交通减排。

7.2.4 发展管理

交通管理方式包括交通需求管理和交通系统管理两方面。以低碳为导向的城市交通管理模式应从这两方面入手，对城市交通系统进行合理引导和管理。

实施交通需求管理。在优先发展公共交通的同时,通过有效交通需求管理措施来引导私人小汽车合理使用,建立以公共交通为主导的城市交通发展模式,对于缓解交通拥堵、降低环境污染和温室气体排放至关重要。

优化低碳交通系统管理模式。通过改进运营组织,加快交通智能化建设等手段来实现以低碳为目标优化交通系统管理模式。

7.3 本章小结

本章主要以上海市交通系统为研究对象,利用情景分析法,通过建立转型、弱干预、强干预三个不同力度减排情景,分别预测不同情景下上海交通未来碳排放总量。分析得出,在未来通过产业升级转型、能源技术革新、限制机动车保有量、增大公共交通分担率等一系列措施能有效减少城市交通运输部门的碳排放总量。最后,根据前文对交通碳排放从生成到扩散再到未来变化趋势的分析全面分析,从发展政策、理论方法和技术手段三个层次,针对机动车限行、公交优先、慢行交通建设、多中心城市建设、新能源汽车发展等多方面全面提出低碳视域下城市交通发展战略,为低碳交通进一步发展提供理论依托。

参考文献

- [1] Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R., et al. Measurement of emission from air pollution sources. 5. C12-C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36:1169 -1180.
- [2] DeFries, T.H., Sabisch, M., Kishan, S., et al. In-use fuel economy and CO₂ emissions measurement using OBD data on US light-duty vehicles[J]. SAE International Journal of Engines, 2014, 7(3):1382-1396.
- [3] Claggett, M., Shrock, J., Kenneth, E.N. Carbon monoxide near an urban intersection[J]. Atmospheric Environment, 1981, 15(9):1633-1642.
- [4] Baldauf, R.W., Heist, D., Isakov, V., et al. Air quality variability near a highway in a complex urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2013, 64:169-178.
- [5] White, B.A., Tsourdos, A., Ashokaraj, I., Subchan, S., et al. Contaminant cloud boundary monitoring using network of UAV sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(10):1681-1692.
- [6] W.S. Bouhamra, S.A. Abdul-Wahab. Description of outdoor air quality in a typical residential area in Kuwait[J]. Environmental Pollution, 1999, 105(2): 221-229.
- [7] A.S. Tomlin, R.J. Smalley, J.E. Tate, J.F. Barlow, S.E. Belcher, S.J. Arnold, A. Dobre, A. Robins. A field study of factors influencing the concentrations of a traffic-related pollutant in the vicinity of a complex urban junction[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(32): 5027-5037.
- [8] K.N. Dirksa, M.D. Johnsb, J.E. Hay, A.P. Sturman. A semi-empirical model for predicting the effect of changes in traffic flow patterns on carbon monoxide concentrations[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(19): 2719-2724.
- [9] Gokhalea, S., Pandianb, S. A semi-empirical box modeling approach for predicting the carbon monoxide concentrations at an urban traffic intersection[J]. Atmospheric

- Environment, 2007, 41(36): 7940-7950.
- [10] Oscar, S., Kanok, B., and Matthew, B. An energy and emissions impact evaluation of intelligent speed adaptation [C]. Proceedings of the 8th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, September 17-20, 2006: 1257–1262.
- [11] Ritner, M., Westerlund, K. K., Cooper, C. D., and Claggett, M. Accounting for acceleration and deceleration emissions in intersection dispersion modeling using MOVES and CAL3QHC[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, 63(6), 724-736.
- [12] Int Panis, L., Beckx, C., Broekx, S., De Vlieger, I., Schrooten, L., Degraeuwe, B., Pelkmans, L. PM, NO_x and CO₂ emission reductions from speed management policies in Europe[J]. Transport Policy, 2011, 18(1): 32-37.
- [13] Perez, P. & Trier, A. Prediction of NO and NO₂ concentrations near a street with heavy traffic in Santiago, Chile[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(10):1783-1789.
- [14] Azadeh, A., Ghaderi, S.F. & Izadbakhsh, H. Integration of DEA and AHP with computer simulation for railway system improvement and optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 195(2): 775-785.
- [15] Abou-Senna, H., Radwan, E. VISSIM/MOVES integration to investigate the effect of major key parameters on CO₂ emissions[J]. Transportation Research Part D, 2013, 21, 39-46.
- [16] Bartin, B., Mudigonda, S., Ozbay, K. Estimation of the impact of electronic toll collection on air pollution levels using microscopic simulation model of a large-scale transportation network[J]. Transportation Research Record, 2007, 2011: 68-77.
- [17] Perez, P., Trier, A. Prediction of NO and NO₂ concentrations near a street with heavy traffic in Santiago, Chile[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(10):1783-1789.
- [18] Int Panis, L., Beckx, C., Broekx, S., et al. PM, NO_x and CO₂ emission reductions

- from speed management policies in Europe[J]. *Transport Policy*, 2011, 18(1): 32-37.
- [19] Jonkers, E., Van Noort, M., Van Der Veen, J.L. Parking guidance - Modelling, simulation and impact assessment[C]. *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011: 858-864.
- [20] Burón, J. M., Aparicio, F., Izquierdo, Ó., Gómez, Á., and López, I. Estimation of the input data for the prediction of road transportation emissions in Spain from 2000 to 2010 considering several scenarios[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(30): 5585-5596.
- [21] Tuia, D., Ossés de Eicker, M., Zah, R., Osses, M., Zarate, E., and Clappier, A. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(17), 3658-3671.
- [22] Int Panis, L., Broekx, S., and Liu, R. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1): 270-285.
- [23] Stevanovic, A., Stevanovic, J., Zhang, K., et al. Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions[J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2128(1): 105-113.
- [24] Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Breunese, E.A. Variable speedlimits for green mobility[C]. *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011, 2174-2179.
- [25] Boriboonsomsin, K., Barth, M. Impacts of freeway high-occupancy vehicle lane configuration on vehicle emissions[J]. *Transportation Research Part D*, 2008, 13(2), 112-125.
- [26] 邓顺熙, 成平. 西安城市交通干道汽车污染物排放因子[J]. *交通环保*, 1999, 20(4): 7-10.

- [27] 付琳琳, 邵敏, 刘源, 等. 机动车 VOCs 排放特征和排放因子的隧道测试研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25 (7): 879-885.
- [28] 曹宏林, 郭冬冬, 杜谦. 车载排放测试技术研究[J]. 重型汽车, 2011, 5: 27-28.
- [29] 秦孔建, 李孟良, 高继东等. 天津市在用车辆排放车载测试试验研究[J]. 汽车工程, 2007, (9): 771-775.
- [30] 蒲一超. 上海城市道路路侧机动车排放污染物浓度变化分析——以上海市真南路为例[J]. 交通与运输(学术版), 2013, 29(2): 129-132.
- [31] 谢涛, 刘锐, 胡秋红等. 无人机大气环境应急监测系统设计探讨[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6L): 289-293.
- [32] Zhang, L., Yin, Y., Chen, S. Robust signal timing optimization with environmental concerns [J]. Transportation Research Part C, 2013, 29(1): 55-71.
- [33] 石灵芝, 邓启红, 路婵, 刘蔚巍. 基于 BP 神经网络的大气颗粒物 PM10 质量浓度预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1969-1974.
- [34] 徐伟嘉, 幸鸿, 余志. 道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 533-538.
- [35] 莫飞, 于雷, 宋国华. 车载尾气检测技术及相关研究综述[J]. 车辆与动力技术, 2006, (4): 57-62.
- [36] H.-D. He, W.-Z. Li. Urban aerosol particulates on Hong Kong roadsides: Size distribution and concentration levels with time[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(2): 177-187.
- [37] 陆键. 当代世界城市低碳本位的交通战略[J]. 上海城市管理, 2011, 1: 47-51.
- [38] 苏城元, 陆键, 徐萍. 城市交通碳排放分析及交通低碳发展模式研究—以上海为例[J]. 公路交通科技, 2012, 29(3): 143-148.
- [39] 熊驰飞, 吕智林, 叶嫣. 考虑排放因素的公交优先信号控制优化方法研究[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(4): 75-79.

- [40] Lee, G., You, S. I., Ritchie, S. G., et al. Assessing air quality and health benefits of the Clean Truck Program in the Alameda corridor, CA[J]. *Transportation Research Part A*, 2012, 46(8), 1177-1193.
- [41] Saboohi, Y., Farzaneh, H. Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(10): 1925-1932.
- [42] Van der Voort, M., Dougherty, M. S., and van Maarseveen, M. A prototype fuel-efficiency support tool [J]. *Transportation Research Part C*, 2001, 9(4): 279-296.
- [43] Wada, T., Yoshimura, K., Youhata, H., & Tomiyama, K. Proposal of an eco-driving assist system adaptive to driver's skill [C]. *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011: 1880-1885.
- [44] Van Mierlo, J., Maggetto, G., Van de Burgwal, E., & Gense, R. Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, 218(1): 43-50.
- [45] Frey, H.C., Zhang, K., & Roupail, N.M. Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of delay, road grade, and vehicles based on in-use measurements [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008(42):2483-2489.
- [46] Bandeira, J., Carvalho, D.O., Khattak, A.J., Roupail, N.M., & Coelho, M.C., A comparative empirical analysis of eco-friendly routes during peak and off-peak hours [C]. In *Proceedings of the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- [47] Minett, C.F., Salomons, A.M., Damen, W., Van Arem, B., & Kuijpers, S., Eco-routing: Comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles [J]. *Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS)*, 2011:32-39.
- [48] J., Kang, T., Ma, F., & Ma, J., Huang, Link-based emission model for eco routing

- [C]. Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunication (ITST), 2011:207-212.
- [49] Ahn, K, Rakha,H. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions [J]. Transportation Research Part D, 2008(13):151-167.
- [50] 黎明, 宋国华, 于雷, 张嫣红. 基于 VISSIM 的道路交通排放评价可行性分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2013(5):56-63.
- [51] Richter, M., Zinser, S., & Kabza, H., Comparison of eco and time efficient routing of ICEVs, BEVs and PHEVs in inner city traffic [C]. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012:1165-1169.
- [52] Boriboonsomsin, K., Barth, M.J., Weihua Zhu, and Vu, A., Eco-routing navigation system based on multisource historical and real-time traffic information [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2012(13): 1694-1704.
- [53] 苏小芳, 范炳全, 黄远东, 刘娟娟. 城市次干道路段机动车污染物排放因子的测定[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(4): 318-322.
- [54] 傅立新, 郝吉明, 何全东, 贺克斌. 城市街道汽车污染扩散规律模拟研究[J]. 环境科学, 1999, 20(6): 22-25.
- [55] 刘迪, 卢振兰. 城市道路机动车尾气污染物扩散模型研究概况[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(1): 11-23.
- [56] 中华人民共和国环境保护部. 道路机动车排放清单编制技术指南 (试行) [EB/OL]. Accessed on 2014-12-1.
http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/t20140708_278382.htm.