

成都市

大气环境污染成因与 控制对策研究

柴发合 周来东 / 主编



Cause Analysis and Countermeasures of
Atmospheric Pollution in Chengdu

中国环境出版社

成都市大气环境污染成因与控制对策研究

Cause Analysis and Contermeasures of Atmospheric Pollution in Chengdu

柴发合 周来东 主编



中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

成都市大气环境污染成因与控制对策研究/柴发合,
周来东主编. —北京: 中国环境出版社, 2017.5
ISBN 978-7-5111-3093-8

I. ①成… II. ①柴… ②周… III. ①空气污染—
污染防治—研究—成都 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 042149 号

责任编辑 葛莉 郑中海
责任校对 尹芳
封面设计 岳帅

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (第二分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 6 月第 1 版
印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 19
字 数 462 千字
定 价 95.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

21 世纪初,成都市中心城区大气环境污染相当严重,中心城区燃煤发电、冶金、建材等高耗能高污染企业众多,燃煤是城区工业和居民主要的生活燃料,道路扬尘和工地扬尘污染防治水平低,机动车排气污染显现,以二氧化硫、扬尘、氮氧化物为主的空气污染问题突出。当时民众戏称成都为“尘都”,天色灰暗、灰霾天气频繁出现、很少见到蓝天,严重影响了城市形象和居民健康。为此,市政府决心开展大气污染成因研究,为科学治理大气污染提供科技支持。本书以 2000—2003 年完成的成都市大气环境质量现状调查与污染控制对策研究项目技术报告为基础编制而成。该项目是成都市政府立项实施的科技攻关课题,是成都市历史上首次立项实施的全面系统的大气环境科学研究工作。项目以中心城区为研究对象,以 2000—2001 年为目标年,从现场调查、外场监测取样与成分分析、数据处理到编制报告历时 3 年多,内容包括大气环境质量现状评价研究、大气污染源及污染物排放清单调查研究、污染气象特征及其对环境质量的影响、大气颗粒物来源解析、环境空气质量模型建立与运用、污染控制对策研究等。项目研究成果在指导 21 世纪初成都市政府开展大气污染防治工作中起到了重要的科技支持作用。2005 年该项目获四川省政府科技进步二等奖。

本书介绍的研究成果虽然完成于 2003 年,但其成果仍然具有一定的借鉴意义。首先,大量与污染源及排放清单、空气质量观测等相关的历史数据,可通过对比分析为今天的空气污染防治提供借鉴;其次,以颗粒物为主的污

染来源解析成果，特别是成都市第一次 $PM_{2.5}$ 浓度与成分监测数据可为当前成都市大气颗粒物/灰霾污染成因及变化规律分析和污染防治绩效评估提供历史背景；最后，实施的污染气象实测成果仍然是中心城区风场、逆温生消规律的最新外场实测成果。

本书由柴发合、周来东策划，由柴发合、周来东、段宁、车亚非统稿，柴发合负责技术审定，周来东负责校核。参与编制人员主要有：第1章由柴发合、段宁（女）完成；第2章由游军、陶红群、吴祥龙、何建、张普、王琴玲、瞿伦强、陈琳、贾滨洋完成；第3章由聂鑫淼、李定美完成；第4章由靳小兵、廖伍塔、聂鑫淼完成，其中“污染气象外场强化观测”主要由靳小兵组织完成；第5章、第6章由王淑兰、王琴玲、张普、何晓静完成；第7章由周来东、陶红群、段宁完成；第8章由段宁、陈义真、薛志钢完成。此外，校核过程中，尹德生、宋铭洋清绘了部分图件。

本书在成书出版过程中得到了成都市环境保护科学研究所的经费支持，在课题研究过程中得到时任成都市环境保护局领导包惠、吴松柏和时任中国环境科学研究院领导的大力支持和指导，在此表示衷心感谢。

成都市环境保护科学研究所

2017年5月

目 录

第 1 章 总 论	1
1.1 项目由来	1
1.2 研究目标	2
1.3 研究区域及研究重点	2
1.4 研究内容	3
1.5 技术路线	4
第 2 章 污染源现状调查和特征分析	6
2.1 主要调查内容及工作目标	6
2.2 成都市城区能源结构分析	13
2.3 城区工业大气污染源调查	19
2.4 居民生活与第三产业污染源调查	25
2.5 城区机动车污染现状调查	29
2.6 无组织排放源调查	47
2.7 小结	56
第 3 章 成都市环境空气质量变化趋势与现状分析	59
3.1 环境空气质量评价标准	59
3.2 环境空气质量历史回顾（1991—2000 年）	60
3.3 环境空气质量现状	68
3.4 环境空气质量强化监测结果	76
3.5 小结	97
第 4 章 成都地区污染气象特征及其对环境空气质量的影响	99
4.1 成都地区污染气象特征分析	99

4.2	强化监测期气候及气象条件观测结果与分析.....	109
4.3	环境空气质量与气象条件相关性分析.....	138
4.4	小结.....	147
第 5 章	成都市大气颗粒物的物理、化学特征分析.....	149
5.1	颗粒物质量浓度的分布特征.....	149
5.2	监测期间颗粒物的化学组成特征.....	157
5.3	小结.....	173
第 6 章	可吸入颗粒物来源解析.....	174
6.1	CMB 受体模型的基本理论.....	174
6.2	源与受体（环境）样品的采集及处理.....	181
6.3	源与受体成分谱的特征分析.....	200
6.4	源分担率和贡献值的研究.....	216
6.5	可吸入颗粒物载带的多环芳烃来源识别与解析.....	226
6.6	小结.....	239
第 7 章	大气环境质量模拟与污染来源分析.....	241
7.1	空气质量模型概述.....	241
7.2	ISC3 空气质量模型验证.....	243
7.3	环境空气质量模拟与污染物来源分析.....	250
7.4	污染控制对策环境效果分析.....	268
7.5	小结.....	274
第 8 章	大气污染控制对策.....	276
8.1	成都市控制大气污染已有措施与有效性分析.....	276
8.2	成都市控制大气污染进一步对策建议.....	284
8.3	小结.....	295

第1章 总论

1.1 项目由来

成都市是四川省省会，是全省的政治、经济、科学文化、金融、交通、通信中心。它不仅是我国的历史文化名城之一，也是我国的西南重镇和新兴的大型中心城市。

随着社会经济的持续发展，成都市在国内外的影响和地位也不断提高。尤其是近年来在省委、省政府的关怀下，市委、市政府进行了卓有成效的城市改造与建设，相继建成了诸如污水处理厂、二环路、三环路、府南河综合整治、“五路一桥”、环境综合整治、创建清洁卫生城市以及城市道路改造与园林绿化等一大批市政基础设施和市民安居工程，先后荣获了“国家城市环境综合整治奖”“卫生城市”以及“联合国人居奖”等荣誉称号。随着我国“西部大开发”战略的实施，成都市委、市政府抓住大好历史机遇，确立了“跨越式”发展战略，一批高新产业园区的相继开发和新型生活小区雨后春笋般地拔地而起，不仅极大地提升了成都市的城市形象，也创造了优越的投资环境和优质的生活环境，并为城市的高速发展奠定了坚实的基础。

成都市作为我国实施西部大开发的战略高地，其发展速度必将日益加快，在国内外的影响也将愈显突出。特别是“十六大”提出的全面建设小康社会的宏伟目标，更为成都市的环境生态建设指明了方向。

近年来成都市结合旧城区改造、工业结构与布局调整、城市基础设施建设等加大了环境综合整治的力度，加快了污染源治理的步伐，使城市的总体环境质量有了明显的改善，城市面貌有了极大的改观。但由于成都市地处四川盆地腹地，存在常年风速小、静风频率高等不利气象条件，使城市的环境空气质量仍不尽如人意，特别是空气中的悬浮颗粒物污染，成为影响城市形象的重要环境因素。市政府对此极为重视，并指示成都市环境保护局要尽快“弄清影响大气环境质量的主要问题，提出防治对策”。

成都市环境保护局为落实市政府的指示，从2001年3月起便组织实施“成都市大气环境质量现状调查和污染控制对策研究”项目。组成由市环境保护局局长包惠为组长

的领导小组，市局所属有关处、所（环科所）、站（监测中心站）和中国环境科学研究院、四川省气象环评中心等单位参加的课题协作组，由中国环境科学研究院作为技术支撑单位负责实施，开展成都市大气环境质量现状调查与污染控制对策研究工作。

1.2 研究目标

（1）系统调查成都市大气污染源，分析各类污染源的控制和排放特征，建立以 GIS 为平台的成都市大气污染源数据库，为成都市大气污染源的定量管理和大气污染控制对策的制定与实施提供基础工具；

（2）弄清成都市环境空气质量现状，确定主要污染因子及其主要污染区域和污染水平；

（3）通过气象条件、污染源分布与排放特征和环境空气质量之间关系的综合分析，弄清自然因素和人类活动对环境空气质量的影响方式和影响程度；

（4）对成都市大气中 PM_{10} 进行来源解析，确定主要污染源类对 PM_{10} 浓度的贡献，以提出大气颗粒物污染综合防治的方向和重点；

（5）开发成都市大气环境质量模型，并利用该模型模拟成都市的空气环境质量的空分布，分析不同大气污染源对大气污染物浓度的贡献；

（6）分析机动车尾气的污染负荷，定量计算成都市不同地区机动车尾气污染负荷；

（7）提出改善成都市大气环境质量的综合对策和措施。

1.3 研究区域及研究重点

1.3.1 研究区域

该项目的研究区域为成都市中心城区，包括青羊区、武侯区、锦江区、成华区、金牛区和高新区南区所辖区域（三环路以内）。

1.3.2 研究重点

本项目的研究重点为：大气污染源和大气环境质量现状调查评价；大气颗粒物化学组分及来源解析；大气环境质量模型；机动车尾气的污染负荷；大气污染综合控制策略。

1.4 研究内容

(1) 成都市空气环境质量现状评价

利用过去 10 年的空气环境质量历史资料, 分析成都市环境空气质量的变化趋势, 重点通过 2000 年 6 月到 2001 年 5 月自动监测资料和本课题所获得的空气环境质量强化观测资料的综合分析, 弄清研究区域 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 等污染物的时空分布, 以确定成都市主要污染因子和重点污染地区。

(2) 成都市大气污染源调查

调查成都市各类大气污染源的控制和排放情况, 分析其排放特征和时间、空间分布, 建立可视化的成都市大气污染源数据库, 为大气环境定量管理和空气质量预测 (预报) 提供准确的基础工具和资料。

(3) 成都市机动车污染现状调查与评价

通过对成都市机动车现状调查和发展趋势分析, 以及对成都市机动车污染分析, 提出成都市防治机动车污染的对策措施, 为市政府及相关部门对改善成都市大气环境质量提供决策依据。

(4) 成都市大气污染气象特征分析

气象条件是大气污染的外部因素, 掌握成都市污染气象规律, 针对分析大气污染的成因, 制定切实可行的大气污染控制对策。本课题以历史资料分析和同步强化观测相结合的方式, 研究成都市污染气象特征, 并为空气质量模拟提供基础数据。

(5) 成都市大气颗粒物化学组分及来源解析

在成都市不同功能区采集大气中 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 分析大气颗粒物的物理特征、化学组分 (离子、元素、OC、EC) 和部分样品的有机组分, 利用化学质量平衡模型解析颗粒物的来源, 并对成都市大气颗粒物中的有害有机组分及其水平进行分析。

(6) 成都市空气环境质量模拟

根据成都市大气污染源调查结果和污染气象特征, 建立成都市大气质量预测模型, 并利用空气质量加密观测数据对模型进行检验。在此基础上, 应用空气质量模型定量计算不同污染源对环境质量的贡献, 分析区域间的相互影响, 并对大气污染控制方案的环境效果进行检验。

(7) 成都市大气污染综合防治对策研究

对成都市的工业布局、能源结构、污染源排放与控制现状进行系统评价, 结合规划年社会经济发展和大气污染物排放趋势, 提出交通源、工业源、居民生活源、无组织排放源和扬尘控制措施方案, 并进行技术可行性与费用-效益分析, 最终提出达到规划年

环境保护目标的技术上可行、经济上合理、管理上可用的成都市大气污染综合防治推荐方案。

1.5 技术路线

本课题的总体技术路线如图 1-1 所示。

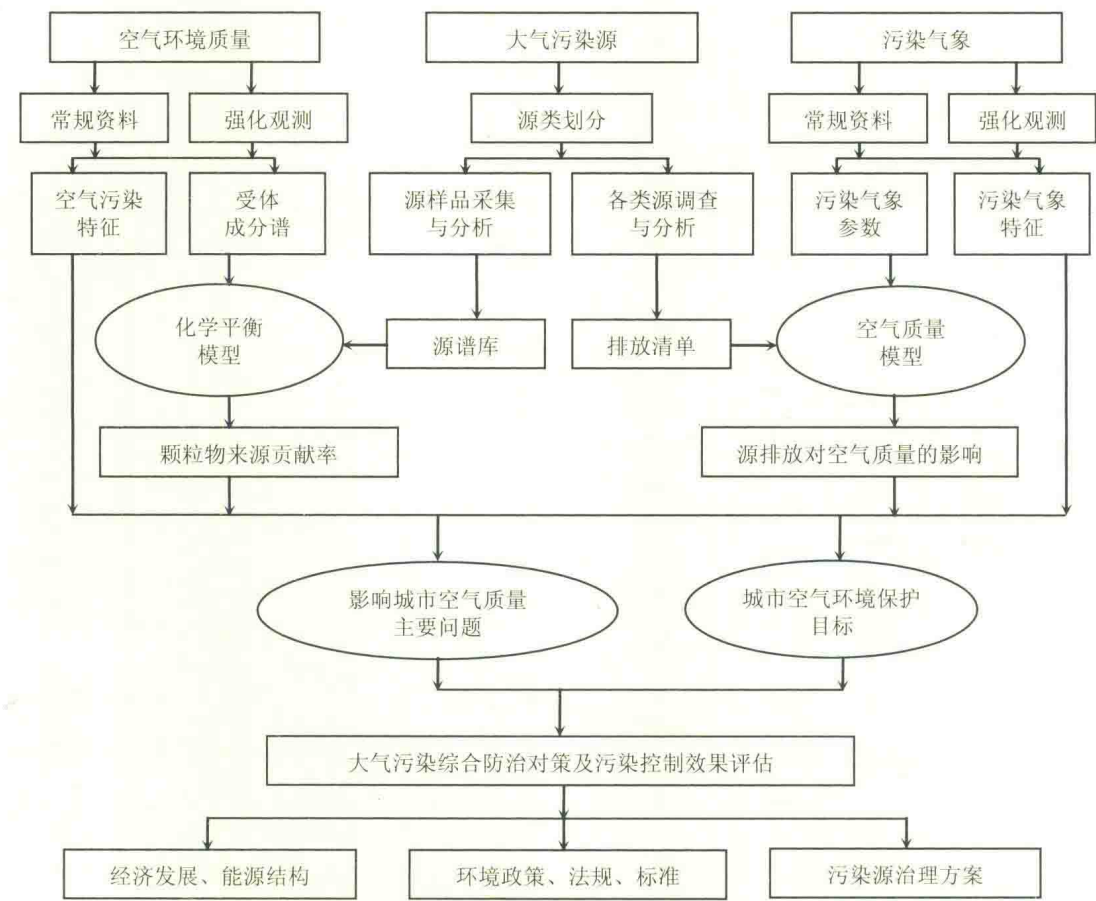


图 1-1 技术路线示意

(1) 收集和利用成都市环境监测中心和气象局近 10 年空气质量和气象观测资料，对上述资料进行综合分析，以了解成都市大气污染的演变趋势，弄清大气污染与气象条件的关系。

(2) 选定典型季节（2001 年 6 月和 2002 年 1 月）进行两次综合加强观测，对市区大气中的 SO_2 、 NO_2 、TSP、 PM_{10} 加密监测，以了解其地域分布；采集 PM_{10} 样品，以分析其中的离子、元素、OC、EC 和有机组分，同时为成都市颗粒物来源解析提供基础数

据：在天府广场同时进行 TSP 和 $PM_{2.5}$ 采样，以了解成都市大气中 TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度的相对比例及所含化学组分的差异；在夏季加强观测中，增加 O_3 浓度观测，以初步分析成都市大气光化学污染的情况；同时布设地面气象观测站和低空探空、小球测风点，以掌握强化观测期间大气地面流场和城市大气边界层热力、动力结构。

(3) 利用统计资料、排污申报数据、排污收费数据、污染源监测数据分析和实地调查相结合的方法，并借鉴国内外有关科研成果，确定成都市主要大气污染物的排放因子，编制大气污染源排放清单，建立以 GIS 为平台的污染源数据库。

(4) 按污染源排放清单对成都市颗粒物的来源进行分类，对主要源类进行采样和化学组分分析，并部分利用国内外有关数据，建立各颗粒物源类的源谱，使用强化监测期间得到的受体颗粒物的质量浓度、EC、OC、元素和离子等分析结果，应用化学平衡模型 (CMB) 对成都市的大气颗粒物的来源进行解析，给出源解析结果，分别确定夏季和冬季不同污染源类对颗粒物浓度的的贡献率和贡献值。

(5) 利用污染源排放清单和强化监测期间取得的气象数据、监测数据，建立美国 EPA 推荐的 ISC3 空气质量模型并对其进行校验。应用经过检验的空气质量模型定量模拟 2000 年成都市主要大气污染物 (SO_2 与 PM_{10}) 的年、日均值浓度的地域分布，分析不同污染源 (点、线、面；工业、民用、交通、自然) 对环境空气质量的贡献。

(6) 在弄清成都市大气污染的成因和不同源对空气质量影响程度的基础上，根据城市大气环境保护目标，结合城市社会经济发展和大气污染物排放趋势，提出交通源、工业源、居民生活源、无组织排放源和扬尘控制措施方案，并进行技术可行性与费用-效益分析。

第 2 章 污染源现状调查和特征分析

2.1 主要调查内容及工作目标

2.1.1 大气污染源调查的主要工作目标

主要工作目标是：

- 1) 确定影响成都市城区大气环境的主要污染物、主要污染源及其排放特征；
- 2) 掌握三环路以内居民生活污染源、第三产业污染源和机动车尾气污染源排放特征（包括点源、面源、线源）；
- 3) 编制各类大气污染源排放清单，为建立成都市城区环境空气质量模型提供可靠的输入数据；
- 4) 弄清城区工业结构和布局、能源结构特征及其变化趋势等，为制定大气污染控制对策提供依据；
- 5) 建立以 GIS 为平台的成都市城区大气污染源数据库，为成都市城区大气污染源的定量管理和大气污染控制对策的制定与实施提供基础工具。

2.1.2 污染源调查的主要工作内容

主要工作内容是：

- 1) 以成都市城区工业企业大气污染源调查为重点，采取先调查市属以上工业企业，然后调查区属工业企业的方法，主要抓住 5 个电厂、2 个冶金企业和 3 个玻璃生产企业及其他耗煤大户。
- 2) 根据成都市统计局提供的年度统计数据进行分析。
- 3) 收集成都市计委、市经委关于成都市工业结构和布局的规划方案，对主要工业区进行实地踏勘，对工业结构和布局进行调查和分析。
- 4) 完成成都市城区高校、医院和宾馆燃煤、燃气和燃油锅炉的调查。

- 5) 对二环路以内及城乡接合部的燃煤居民进行现场统计调查。
- 6) 对房地产建筑进行统计，对堆料场和裸露地面进行调查。
- 7) 对城区机动车污染进行调查。

2.1.3 污染源调查的范围和工作程序

本次大气污染源调查的范围为成都市中心城区的 6 城区，重点为三环路以内；调查基准年为 2000 年。

调查工作流程如图 2-1 所示。

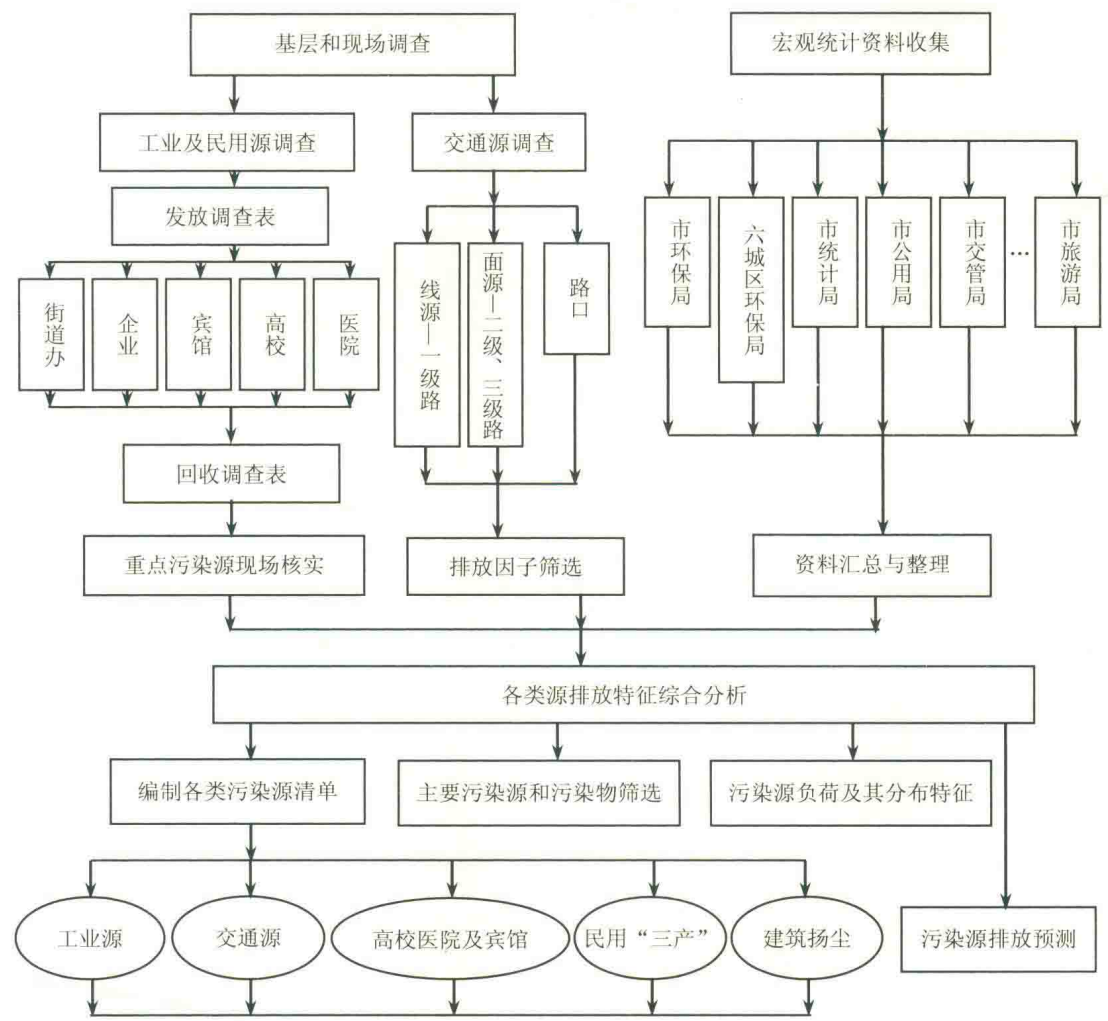


图 2-1 大气污染源调查工作流程

2.1.4 污染源调查方法

2.1.4.1 工业污染源调查方法

成都市城区工业企业大气污染源调查工作量大、涉及面广，需要多方协调工作。根据成都市城区工业企业大气污染源的特点，主要采取了填表调查的方式。即首先对成都市市属以上的 103 家企业和环境污染监理所提供的 100 多家重点收费企业进行核对、分析，筛选出 77 家市属以上企业进行调查。对成都市城区的高新技术开发区、成华区、锦江区、武侯区、青羊区和金牛区 70 家区属工业企业，根据其排污特性进行筛选，并实施现场调查和核实。

2.1.4.2 机动车污染源调查方法

机动车污染物排放是流动源排放，将机动车行驶道路分为线源和面源。原则上，一级道路归为线源，二级、三级道路归为面源。

(1) 面源划分

研究范围为成都市区三环路以内。面源按网格划分，以天府广场定为城区网格的坐标原点，1 km×1 km 网格有 48 个，2 km×2 km 网格有 46 个。成都市区三环路以内共有 94 个网格，三环路内区域划分及网格分布见表 2-1。

表 2-1 三环路内区域划分及网格分布

区域划分	网格数/个	环路长度/ km	环内面积/ km ²	占三环路内总面积 比例/%	占五城区总 面积比例/%
一环路内	30	19.377	28.315	14.7	6.1
二环路内	51	28.028	60.167	31.2	12.9
三环路内	94	51.017	192.842	100.0	41.4
一环、二环路间	21	—	31.852	16.5	6.8
二环、三环路间	43	—	132.675	68.8	28.5
五城区建成区面积	—	—	172.000	—	36.9
五城区国土面积	—	—	466.000	—	100.0

注：五城区建成区面积及国土面积数据来源于成都市城建统计年鉴。

(2) 线源划分

包括一环路、二环路、三环路、东西干道（蜀都大道）、南北干道（火车南路北站至火车南路）及三环路以内的其他一级道路。

(3) 调查内容及方法

成都市机动车保有量状况分析：调查市交管、市城建的相关数据并对统计数据进行分类、分析。

线源车流量统计：按代表性路段、时间、频次，依大、中、小以及摩托车的流量分类统计。

面源车流量统计：按网格内代表路段时间、频次，依大、中、小以及摩托车的流量分类统计。

交通路口车辆滞留量统计：按代表性交通路口时间、频次，对在红灯时间内路口滞留的车辆数进行统计。

市区内平均车速调查：在选择代表性路段上，监测车辆行驶中的怠速、 ≤ 10 km/h、 $10\sim 20$ km/h、 $20\sim 30$ km/h、 $30\sim 40$ km/h、 > 40 km/h 所占的时间比例。

各级道路车流量昼夜变化规律调查：选择成都市一级、二级、三级道路，在代表路段按一定时间、频次，监测全天 24 h 车流量并进行相关分析。

排放量计算：按一定的排放因子和机动车污染物计算模式，选择 CO、HC、NO₂、颗粒物 4 个具有代表性的污染物，对排放量进行计算、研究与分析。

污染负荷分担率计算：成都市机动车污染负荷、按车型、道路长度、区域、固定源，分别计算出污染负荷的分担率。

2.1.4.3 居民生活污染源调查方法

根据居民生活污染源为无组织排放面源的特征，用网格法进行调查。二环路内 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 为一个网格，考虑易于得到各街道办事处的统计数据，因此以街道办事处为一个基本单元，这样易于在网格上表示。重点调查区域在老城区难以实现“煤改气”的低矮建筑居民区，青羊区以斌升街道办事处和西御河沿街街道办事处为代表，锦江区以天涯石北街和梓潼桥正街街道办事处为代表，武侯区以小天竺街道办事处为代表，金牛区以乡农市街道办事处为代表，基本覆盖了老城区的东西南北中，具有较强的代表性。其中，天涯石北街与小天竺这两个街道调查了辖区内所有的居委会，而其余的为抽样调查，调查了部分居委会。调查内容包括：各街道办事处的详细地址，总人口数，总户数，面积，居民的燃料结构（即使用燃煤的户数、使用液化石油气的户数、使用天然气的户数），并计算出各所占的比例，在此基础上，估算出整个老城区其他街道办事处辖区内的居民的燃料结构。

2000 年成都市二环路以内的气化率已达 98%，一环路与二环路之间各街道办事处辖区内的居民基本全部使用天然气作为燃料，因此，这部分的调查采用简便的方法，即认为各街道办事处的总人口、总户数全部使用天然气。

二环路至三环路之间按 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 为一个网格。从成都市煤气总公司了解的资料显

示, 建成或即将建成的小区铺设了燃气管道, 而未铺设管道区域的居民则以煤或液化石油气为燃料。因此, 根据这些资料并结合乡镇或街道办事处辖区的统计数据, 得到各辖区内居民的燃料结构及比例。其中重点区域在靠近三环路的城东、城北。

2.1.4.4 第三产业污染源调查方法

第三产业的宾馆、餐饮、茶、浴房, 有些比较集中, 有些又很分散, 且变动性较大。从各区环境保护局所查找的最新第三产业登记表或统计表, 基本代表了目前成都市的第三产业的现状。另外, 由于大多数的登记表和统计表都以街道办事处分类, 因此, 第三产业也以街道办事处为一个单元, 同样以面源的方式考虑。通过各区所提供的资料, 并结合实地调查, 重点统计第三产业比较集中的街道办事处的能源种类、年用量等。

2.1.5 污染物排放量的计算方法

2.1.5.1 工业及民用大气污染物排放计算

对未做实际监测的大气污染源, 采用物料衡算的方法确定其排放量。大气污染源烟尘、SO₂、NO_x、CO 和 HC 的计算公式和方法如下。

(1) 锅炉烟尘排放量计算

$$G_d=B_g(1-\eta_c)[(1-q_4)A_gd_{th}+q_4] \tag{2-1}$$

式中: G_d ——烟尘排放量, t/h;
 B_g ——燃料消耗量, t/h;
 q_4 ——机械未完成燃烧损失百分数, %;
 η_c ——除尘器效率, %;
 A_g ——燃料的应用基灰分, %;
 d_{th} ——锅炉排烟带出的烟气与灰分的百分比, %。

(2) SO₂ 排放量计算

$$G_{SO_2}=2\times B_g\times C(1-\eta_{SO_2})Y_s \tag{2-2}$$

式中: G_{SO_2} ——SO₂ 排放量, t/h;
 B_g ——燃料消耗量, t/h;
 η_{SO_2} ——脱硫效率, %;
 C ——燃料中的含硫量在燃烧后氧化成 SO₂ 的百分比, %;
 Y_s ——燃料的应用基含硫量, %。