



北方集中供暖地区建筑因素对 PM_{2.5} 排放特性影响

中国建筑科学研究院
2014.5.1

项目信息

项目资助号: G-1302-17644

Grant Number: G-1302-17644

项目期: 2013年4月1日至2014年4月1日

Grant period: 04/01/2013-04/01/2014

所属领域: 建筑

Sector: Building

项目概述:

目前,可入肺颗粒物($PM_{2.5}$)已经成为了政府特别关心,百姓特别关注的焦点问题之一。大量研究表明长期暴露于较高浓度 $PM_{2.5}$ 大气环境中个体容易诱发上呼吸道疾病;携带有生物、化学及物理毒性的 $PM_{2.5}$ 超细颗粒能够通过呼吸系统进入肺部毛细血管,造成人体肺炎、哮喘、哮吼等疾病发生。美国杨百翰大学流行病学专家 Arden Pope 指出,较小的 $PM_{2.5}$ 颗粒可以穿透人体呼吸道的防御毛发状结构且深达人体肺部,有些超细颗粒甚至可以渗透进入血液,从而引发人体上呼吸道疾病;中国工程院院士、北京大学环境学院教授唐孝严亦指出, $PM_{2.5}$ 能够进入支气管、肺部和血液,造成呼吸系统和心血管系统疾病;此外,其对人体免疫系统、生育系统、神经系统等也可能造成损害。自2011年11月,环保部在《环境空气质量标准》二次公开征求意见时,首次将 $PM_{2.5}$ 纳入国标,并将年均和日均浓度限值分别定为 $35\mu g/m^3$ 和 $75\mu g/m^3$,各直辖市及省会级城市相继宣布对 $PM_{2.5}$ 颗粒物实行时时监测,同时温家宝总理宣布 $PM_{2.5}$ 是“十二五”期间大气污染物削减的重要目标参数。如何从源头控制 $PM_{2.5}$ 的排放,降低大气环境中 $PM_{2.5}$ 的质量浓度,改善大气环境质量已经成为了社会各界共同面临的重要问题。

据不完全统计,除了机动车外北京地区 $PM_{2.5}$,有16.7%来自煤炭燃烧排放,16%来自全市建筑工地扬尘,全市的水泥厂、汽车喷漆等工业喷涂占16.3%,农村养殖、秸秆焚烧占4.5%。据2013年1月14日发布《迈向环境可持续的未来中华人民共和国国家环境分析》报告指出,全球10大空气污染城市中,中国占7个,其中北京、石家庄及太原等6个城市位于北方集中采暖地区,据北京市环境监测网不完全统计,2012年北京出现7次大气六级以上严重污染,全部出现在集中采暖季节,由此可见集中采暖过程中排放的污染物是造成 $PM_{2.5}$ 质量浓度增加的重要原因。集中采暖与建筑能耗息息相关,降低建筑能耗、提高建筑节能标准能够明显从源头减少 $PM_{2.5}$ 颗粒物的排放量;同时,北京地区约6000万平方米建筑工地,去年改建新建项目6885项,建筑扬尘亦成为 $PM_{2.5}$ 颗粒物产生重要的来源;且不同类型建筑排放的不同性质的 $PM_{2.5}$ 颗粒物,民用建筑厨房油烟、工业建筑的颗粒物粉尘对大气 $PM_{2.5}$ 颗粒物贡献率不甚明确,文献表明由于城市厨房油烟及工业粉尘粒径分布较小,同时容易产生二次污染,因此二者亦成为 $PM_{2.5}$ 重要来源。由此看出,诸如冬季采暖、建筑扬尘及建筑类型等建筑因素很大程度上影响大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度。

基于建筑因素能够很大程度上影响 $PM_{2.5}$ 颗粒物的排放,然而二者之间缺乏定量关系,降低单位建筑能耗能够降低多少 $PM_{2.5}$ 颗粒物的排放量,提高建筑节能标准能够降低多少 $PM_{2.5}$ 颗粒物排放量,目前不甚清晰。目前北京地区节能建筑改造完成百分比不足10%,待全部建筑节能改造完成后会使 $PM_{2.5}$ 降低到何种程度,如何更加有效的控制新建、改建等施工相关活动产生的 $PM_{2.5}$,如何确定不同类型建筑排放污染物对大气环境中 $PM_{2.5}$ 的贡献率,这一系列疑问引人深思,然而这些重要问题更需要迫切解决。探讨建筑因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 的影响,不仅能够定量考核建筑节能实施过程中发挥的环境效益,同时能够定量的减少 $PM_{2.5}$ 的排放量,为国家实施节能减排提供重要的依据,同时能够有效的改善大气环境质量,从节能环保方面来讲,此课题无疑具有非常重大的意义。

Project Discription:

Alveolic particle mater ($PM_{2.5}$) has become a particular concern to the government and all of the people. Nowadays, the recent continuous thick cloud of hazardous smog enveloped the Beijing city and triggers the citizen upset and anxiety. A large number of studies have shown that the individual long-term exposure to atmospheric environment with higher concentrations of $PM_{2.5}$ could easily suffer from upper respiratory tracts diseases. Alveolic particle mater ($PM_{2.5}$) carrying biological, chemical and physical toxicity could lead to the occurrence of pneumonia, asthma and croup. Arden Pope, a famous epidemiologist from Brigham Young University, pointed out that $PM_{2.5}$ can penetrate the defense of the human hair-like respiratory tracts into human lungs and some of them could even penetrate into the blood, causing the human upper respiratory tract diseases. Xiaoyan Tang, an academician from Chinese Academy of Engineering and Peking University professor, also pointed out $PM_{2.5}$ can enter into the bronchus, lung, and blood, causing respiratory and cardiovascular diseases and damaging the body's immune system, reproductive system and nervous system. The threshold value of $PM_{2.5}$ had been written in national standard by the Ministry of Environmental Protection for the first time and $PM_{2.5}$ has been monitored by different cities in China in November 2011 and the daily and year average value were $35\mu g/m^3$ and $75\mu g/m^3$ respectively. The Peking university school of public health and the international environmental organization Greenpeace jointly released the report "Assessment Study of Health Hazards and Economic losses of $PM_{2.5}$ ", which indicated that 2589 people died and 2.06 billion Yuan had been lost due $PM_{2.5}$ in 2012. The premier Wenjiabao presented that recent fog and haze had great impact on human everyday life and physical health, and the effective measures should be taken to accelerate the adjustment of industrial structure and layout, to promote energy conservation, and construction of ecological civilization and the index of $PM_{2.5}$ had been become the cutting target of during "12th Five-Year". How to control $PM_{2.5}$ emissions from the source and how to reduce $PM_{2.5}$ mass concentration in the atmospheric environment and improve the quality of atmospheric environment have become an important issue for whole society.

According to incomplete statistics, coal combustion, construction, industrial manufacture and straw burning contributed to about 16.7%, 16%, 16.3% and 4.5% respectively. According to the report of "Toward an Environmentally Sustainable Future: Country Environmental Analysis of the People's Republic of China" released on January 14, 2013, for "The Global Ten Polluted Cities", seven serious polluted cities are from China and six of them, such as Beijing, Shijiazhuang, are located in north central heating regions. There were twelve times for Beijing's air quality hit level five, the worst rating in the government's guidelines in the central heating season of 2012, which was an important reason for $PM_{2.5}$ increasing. Central heating is closely linked with the building energy consumption. Reducing energy consumption and improving building energy efficiency standards could significantly reduce emissions of $PM_{2.5}$. Meanwhile, there are about 60 million m^2 construction site and 6885 new projects in Beijing city, which have also become the important source of $PM_{2.5}$. Kitchen fumes and industrial construction particulate dust are also important sources of $PM_{2.5}$ and some literatures indicate that smaller urban kitchen fumes are more easier to produce secondary pollution. In summary, the winter heating, construction dust and building types are largely affected the $PM_{2.5}$ mass concentration in the atmospheric environment.

Although, building factors can greatly influence the emissions of $PM_{2.5}$ particulate matter, there are lack of quantitative relationship between of them and how to affect the $PM_{2.5}$ emission due to decreasing unit building energy consumption and improving building energy efficiency standards are not clear.

So far, the completion percentage of energy-saving building renovation and reconstruction in Beijing area is less than 10%, how much PM_{2.5} could be reduced after the all the energy-saving building have completed ?

How to control the PM_{2.5} generated by new construction, renovation and other construction-related activities more efficiently, how to determine the contribution rate of PM_{2.5} from different types of building, which are thought-provoking problem. However, these important questions need to be urgently addressed. To discuss the impacts of building factors, not only can quantitative inspect environmental benefits in the implementation process of building energy-saving, but also can reduce the PM_{2.5} emissions quantitatively, which lay strong foundation for the national implementation of energy conservation and improvement of the atmospheric environmental quality. This research has great significance undoubtedly, in terms of energy saving and environmental protection.

项目成员：徐伟、邹瑜、刘志坚、陈曦、张时聪、袁闪闪、孙德宇

Project team: XU Wei、ZOU Yu、Liu Zhijian、CHEN Xi、ZHANG Shicong、YUAN Shanshan、SUN Deyu

关键词：供暖、炊事、建筑扬尘、PM_{2.5}、贡献率

Key Word: Heating、Cooking、Construction fugitive dust、PM_{2.5}、Contribution rate

本报告由能源基金会资助。

报告内容不代表能源基金会观点。

This report is funded by Energy Foundation.

It does not represent the views of Energy Foundation.

摘要

本课题主要探讨了北京地区供暖因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 的排放特性影响。课题首先确定研究方法，主要包括源解析法、调研分析法、产排污系数法、建筑能耗目标数值计算法、Arcgis 空间分配数值计算法。根据前人对大气环境不同因素对 $PM_{2.5}$ 贡献率源解析研究，通过对比分析，确定建筑因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 排放的贡献率及排放特性影响。通过查阅相关文献，获得不同供暖方式下 $PM_{2.5}$ 的产排污系数，产排污系数为 $PM_{2.5}$ 的减排量计算基础；通过调研北京锅炉规模、种类、分布及燃料用量及类型，最终确定不同燃料类型的锅炉，不同类型建筑（公共和民用建筑）及不同行政区 $PM_{2.5}$ 的排放量；以调研结果为边界条件，通过数值计算，确定供暖季节及非供暖季节北京不同行政区及不同环路 $PM_{2.5}$ 分布图，从而探讨供暖及不同类型锅炉分布对 $PM_{2.5}$ 排放特性的影响。通过对北京周边农村地区的供暖情况调查，得出北京周边采暖燃料类型、分布及所占比例，得出北京农村不同类型燃料对北京地区 $PM_{2.5}$ 的排放量，同时数值计算了炊事以及建筑工地对北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布特性。通过 TRNSYS 数值计算确定不同类型节能目标，确定在提高节能标准、降低供热温度、能源结构调整及清洁能源替代后 $PM_{2.5}$ 的减排量。通过本项目研究，摸清了目前北京建筑因素对 $PM_{2.5}$ 的排放特性影响现状，定量计算了采取一系列应急措施以后 $PM_{2.5}$ 减排量，最终确定未来五年内随着建筑面积的增长，建筑因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 贡献率。

Summary

The effect of heating factors in Beijing regions on emission characteristics of $PM_{2.5}$ was discussed in this research project. Firstly, the research methods were determined, such as source apportionment method, investigation analysis, the method of generation and emission coefficients, building energy consumption target value calculation method, Arcgis space allocation numerical calculations method. By comparing the previous source apportionment studies of the different atmospheric environmental factors on contribution rate of $PM_{2.5}$, the effect of building factors on $PM_{2.5}$ emission characteristics and contribution in the atmosphere was determined. By consulting related literature, generation and emission coefficients of $PM_{2.5}$ under different heating were obtained, and the emission reductions of $PM_{2.5}$ were calculated on the basis of these coefficients. Through investigating Beijing's boiler size, distribution, fuel amount and type, the emissions of $PM_{2.5}$ regarding to different fuel type, building types and various administrative regions were determined. Taking these investigating results as the boundary conditions, the distribution chart of $PM_{2.5}$ in different administrative regions and different loops of Beijing in the heating season were determined by numerical calculations method. Furthermore, the effect of heating and the distribution of different types' boilers on emission characteristics of $PM_{2.5}$ were explored. By investigating heating situation in the rural areas around Beijing, the fuel type, distribution and proportion for heating around Beijing were obtained, and the emissions of $PM_{2.5}$ in Beijing regions produced by fuels of different types in the rural areas of Beijing were calculated. Meanwhile, the effect of the cooking and construction sites on distribution characteristics of $PM_{2.5}$ mass concentration of Beijing was discussed by the numerical calculation and field measurements. The $PM_{2.5}$ reduction was determined by carrying out efficient measures such as reducing heating temperature, improving energy efficiency standards, adjusting the energy structure and clean energy alternative. According to these research results, the situation of effects of building factors in Beijing on emission characteristics of $PM_{2.5}$ was figured out, and emission reductions of $PM_{2.5}$ was obtained by after taking a series of emergency measures. Finally, the contribution rate of building factors on emission of $PM_{2.5}$ in the atmospheric environment was determined with the growth of the construction area within the next five years.

目 录

第一章 北方集中采暖地区 PM_{2.5} 研究意义及污染现状	1
1.1 PM _{2.5} 研究意义	1
1.2 PM _{2.5} 污染现状	5
1.3 PM _{2.5} 相关的国家政策	9
第二章 建筑因素对 PM_{2.5} 排放特性影响方法学的确定	11
2.1 源解析方法-建筑因素对 PM _{2.5} 贡献率确定方法	11
2.2 不同类型燃料 PM _{2.5} 一次产排污系数确定方法	14
2.2.1 确定不同燃料烟尘 (TSP) 产排污系数	14
2.2.2 不同燃料产生的烟尘质量粒径分布	15
2.3 不同类型建筑节能目标确定方法	18
2.3.1 公建节能目标确定方法	18
2.3.2 住宅建筑节能目标确定方法	19
2.4 空间数值模拟方法	20
2.4.1 ARCGIS 空间分配数值计算法	20
2.4.2 FLUNET 空间数值模拟法	20
第三章 北京地区供热因素对 PM_{2.5} 排放特性影响	23
3.1 前言	23
3.2 北京地区锅炉调查统计结果	24
3.2.1 北京地区锅炉数量及分布概况	24
3.2.2 供热单位燃料情况	24
3.2.3 燃料分布情况	24
3.2.4 锅炉房能耗情况统计	25
3.2.5 全市不同类型建筑供热面积统计	25
3.2.6 锅炉房地理位置分布情况	25
3.2.7 采暖因素产生的 PM _{2.5} 总量	26
3.3 北京周边农村地区采暖调查统计结果	26
3.4 小结	27
第四章 炊事对北京地区 PM_{2.5} 排放特性影响	29
4.1 前言	29
4.2 测试手段	31
4.3 测试对象	32
4.4 测试结果	32
第五章 建筑施工扬尘对北京 PM_{2.5} 排放特性影响	49
5.1 前言	49
5.2 计算方法	51
5.3 测试对象	54
5.4 测试结果	56

第六章 数值计算建筑因素对大气环境 PM_{2.5} 分布特性影响 . . .	58
6.1 前言	58
6.2 Fluent 数值计算研究	59
6.3 Arcgis 数值计算研究	69
第七章 定量评估相关措施对 PM_{2.5} 减量化特征影响	70
7.1 前言	70
7.2 节能标准提高对 PM _{2.5} 减量化影响	72
7.3 降低供热温度对 PM _{2.5} 减量化影响	74
7.4 可再生能源使用对 PM _{2.5} 减量化影响	77
7.5 新建、改建节能建筑对 PM _{2.5} 减量化影响	77
第八章结论、控制对策及展望	79
8.1 结论	79
8.2 控制对策	80
第九章 致谢	82
参考文献	83

第一章 北方集中采暖地区 PM_{2.5} 研究意义及污染现状

1.1 PM_{2.5} 研究意义

目前，雾霾已经成为了政府特别关心，百姓倍加关注的焦点问题之一，最近几年北京地区连续出现的严重污染的雾霾天气更是触动每位市民的神经。

“雾霾”（smog/haze）一词成功入选 2013，2014 年度关键词，进一步反应了公众的迫切关注。2013 年的 1 月，4 次雾霾过程笼罩 30 个省（区、市），在北京仅有 5 天不是雾霾天；2013 年 3 月，北京出现连续雾霾天气 17 天；2013 年 11 月，北京地区出现连续雾霾天气 16；2013 年 12 月，北京地区连续雾霾天气 12 天，具不完全统计 2013 年北京雾霾天气次数高达 100 天。有报告显示，中国最大的 500 个城市中，只有不到 1% 的城市达到世界卫生组织推荐的空气质量标准，其中不同城市出现灰霾的具体天数如下图 1-1 所示，其中有 16 个城市雾霾天数超过 100 天。与此同时，世界上污染最严重的 10 个城市有 7 个分布在中国，中国不同区域地区连续雾霾天气给中国大气环境造成巨大压力与挑战，同时更让国人痛苦不堪。

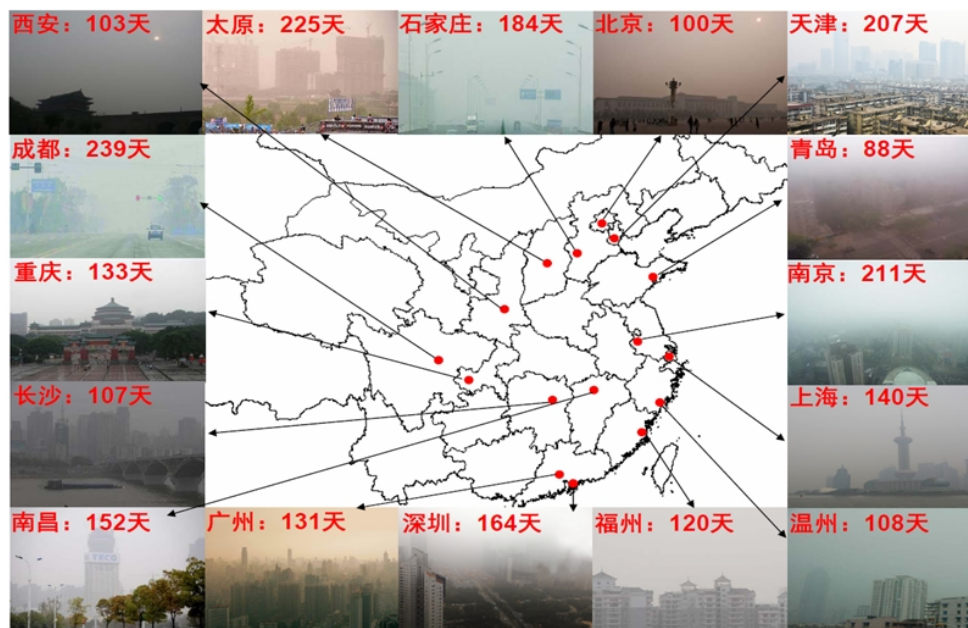


图 1-1 中国 2013 全国不同城市雾霾出现的天数

中国社会科学院、中国气象局联合发布的《气候变化绿皮书：应对气候变化报告(2013)》指出[1]，雾霾天气现象不仅会给气候、环境、健康、经济等方面造

成显著的负面影响，而且可使慢性病加剧、使呼吸系统及心脏系统疾病恶化，改变肺功能及结构、影响生殖能力、改变人体的免疫结构等，从而对人体健康造成重要影响；发表在《美国国家科学院院刊》上的一项研究指出[2]，中国北方普遍使用煤炭取暖导致空气污染，其排放污染物对人体心肺功能造成破坏性影响，居住在淮河以北的 5 亿中国人将共计丧失 25 亿年的预期寿命，换言之，中国北方人的预期寿命平均比南方人少 5.5 年，同时肺癌患病风险率将增大 1.3 倍（OR=2.3），采暖因素（Heating）是人体上呼吸道疾病发生的重要风险因素；世界卫生组织下属国际癌症研究机构在 2013 年 10 月 17 日发布报告指出[3]，大气污染将会诱发癌症发生，并视 PM_{2.5} 为普遍和主要的环境致癌物，同时指出大气环境中雾霾所含的化学成分是诱发癌症的重要风险因子。中国工程院院士、广州呼吸疾病研究所所长钟南山曾在某论坛上指出[4]，“雾霾天气比香烟更易致癌”，近 30 年来，我国公众吸烟率不断下降，但肺癌患病率却上升了 4 倍多，这可能与雾霾天增加有一定的关系。中国环境科学院环境污染与健康研究室研究员张金良指出[5-6]，空气污染对肺癌的影响有一种长期慢性的作用，当人体长期处于空气污染环境中，会造成人体肺部功能永久性的损害，同时当空气中污染物加重时，会增大心血管病人的死亡率。北京环境保护科学研究院研究员彭应登博士还指出[7]，雾霾天空气中的有毒颗粒物，也是造成心血管疾病的重要原因，PM_{2.5} 等颗粒物在血管内长期沉积对血液流动阻力增大，可以增大高血压及脑溢血的疾病的发生率。北京大学孙越等人指出[8]，雾霾天中的颗粒污染物不仅造成心肌缺血或损伤，而且还会引发心肌梗死，雾霾中颗粒物对人体心血管系统造成的损伤是长期的，永久性的不可逆转的。2009 年广东省气象局首席气象专家吴兑公开发表的研究结果表明[9]：考虑 7 年滞后期后，广州市肺癌致死率和霾粒子浓度的相关系数高达 0.97（如图 1-2 和 1-3 所示），这意味着今天呼吸到的“有毒”空气，或许在 7 年之后才会产生致命危害。由此可见，雾霾持久的危害，长久的潜伏期，对人体产生巨大的损伤。尤其最近几年，越来越多的人意识到雾霾的危害严重性，以至于达到谈“霾”色变程度。面对越来越多关于雾霾健康效应的研究结论，其对人体健康潜在危害毋庸置疑！

然后，如何有效的减少大气环境污染，减缓雾霾天气危害程度、保护身体健康迫在眉睫。

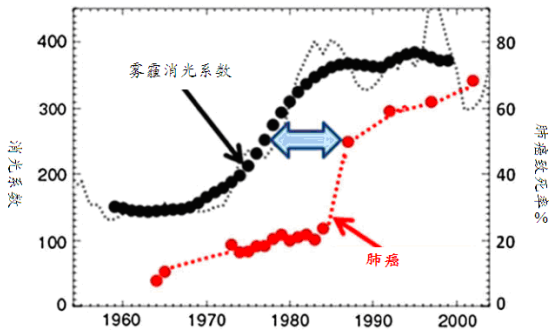


图 1-2 肺癌与雾霾相关性

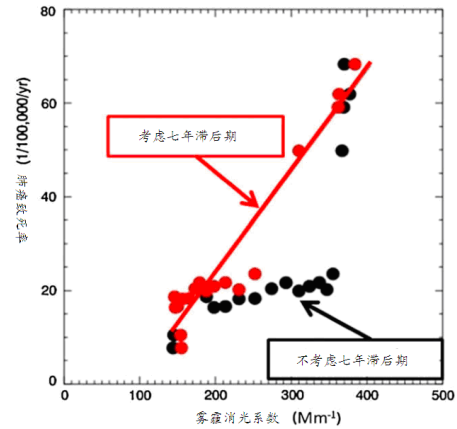


图 1-3 考虑七年滞后期雾霾对肺癌发生率

雾霾天气不仅对人体健康有重要影响，而且对天空可见度也有重要影响。天空可见度的降低不仅直接影响正常的交通运输，同时对气候造成严重的危害[10-11]。众所周知，颗粒物和气态污染物在浓度较低时，对能见度的影响不显著；但浓度较大时，则会改变天空颜色，使能见度降低。当浓度特别高时，会使天空成棕褐色。大气污染物和天气因素都会降低能见度，但能见度降低主要是由于细粒子和气态污染物对光的散射和吸收，使来自物体的光信号减弱[12]。而大气污染物中微细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）的散光作用是造成能见度降低的主要因素，微细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）的散射能造成 60-95% 的能见度减弱。雾霾对气候的影响可分为直接影响和间接影响[13]，直接影响指大气中的颗粒物粒子散射和吸收太阳辐射和地面射出的长波辐射，从而影响地、气辐射收支。同时颗粒物能直接阻挡太阳光抵达地球表面，这样使可见光的光学厚度增大，抵达地面的太阳能下降，从而使地面温度降低，高空的温度增高；雾霾对气候的间接影响是指颗粒物浓度变化会影响云的形成，大气颗粒物作为大气水圈循环中的一个有机部分，主要影响云和降水的微物理过程，同时也影响大气稳定性和云的反照率。由于雾霾中微细颗粒物可以作为一种云凝结核和冰核在云雨形成和增长过程中起重要作用，它不但可以增强或减弱降雨量，并且可以改变云雨的类型，如可使非降水性云转换成降水性云。由于雾霾的存在，导致大气环境可见度的降低及气候的变化，对于航天航空、交通运输、红外探测以生态环境都有巨大的负面影响。雾霾对天空可见度的具体影响效果见图 1-4 和图 1-5 所示。

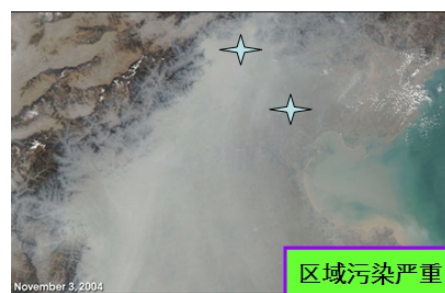
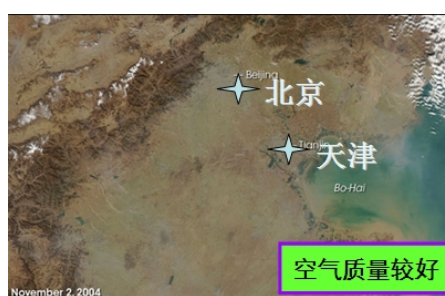


图 1-4 北京地区实拍可见度对比

图 1-5 GIS 气象成像可见度对比

然而雾霾元凶就是 $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}$ 是促进雾霾的发生重要原因, 同时雾霾又加剧了 $PM_{2.5}$ 积累, 所以研究 $PM_{2.5}$ 对于控制雾霾具有重要意义。

虽然 $PM_{2.5}$ 只是地球大气成分中含量很少的组分, 但它对空气质量和能见度等有重要的影响。与空气悬浮颗粒物 (TSP) 相比, $PM_{2.5}$ 粒径小, 富含大量的有毒、有害物质, 且在大气中的停留时间长、输送距离较远, 因而对人体健康和大气环境质量的影响程度更甚。

大量研究表明长期暴露于较高浓度 $PM_{2.5}$ 大气环境中个体容易诱发上呼吸道疾病; 携带有生物、化学及物理毒性的 $PM_{2.5}$ 超细颗粒能够通过呼吸系统进入肺部毛细血管, 造成人体肺炎、哮喘、哮喘等疾病发生[14]。美国杨百翰大学流行病学专家 Arden Pope 指出[15], 较小的 $PM_{2.5}$ 颗粒可以穿透人体呼吸道的防御毛发状结构且深达人体肺部, 有些超细颗粒甚至可以渗透进入血液, 从而引发人体上呼吸道疾病; 中国工程院院士、北京大学环境学院教授唐孝严亦指出[16], $PM_{2.5}$ 能够进入支气管、肺部和血液, 造成呼吸系统和心血管系统疾病, 此外其对人体免疫系统、生育系统、神经系统等也可能造成损害。2011 年 11 月 12 日, 环保部首次将 $PM_{2.5}$ 纳入国标—《GB3095—2012 环境空气质量标准》, 并将年均和日均浓度限值分别定为 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$, 继而各直辖市及省会级城市相继宣布对 $PM_{2.5}$ 颗粒物实行时时监测; 2012 年 12 月 18 日, 北京大学公共卫生学院和国际环保组织绿色和平在京联合发布《 $PM_{2.5}$ 的健康危害和经济损失评估研究》报告, 其中指出 2012 年北京地区由于 $PM_{2.5}$ 引发的因病过早死亡人数为 2589, 经济损失为 20.6 亿元; 2013 年 1 月 29 日两会期间, 温家宝表示, 最近的雾霾天气

对人们生产生活和身体健康都造成影响，应该采取切实有效的措施，加快推进产业结构和布局调整，推进节能减排，建设生态文明，用行动让人民看到希望，其中 $PM_{2.5}$ 是“十二五”期间大气污染物削减的重要目标参数。如何从源头控制 $PM_{2.5}$ 的排放，降低大气环境中 $PM_{2.5}$ 的质量浓度，改善大气环境质量已经成为了社会各界共同面临的重要问题；2014年2月14日，**习近平**总书记在北京考察时指出，应对雾霾污染、改善空气质量的首要任务是控制 $PM_{2.5}$ ，要从压减燃煤、严格控车、调整产业、强化管理、联防联控、依法治理等方面采取重大举措，聚焦重点领域，严格指标考核，加强环境执法监管，认真进行责任追究；2014年3月9日，两会期间**李克强**总理指出，需出重拳强化污染防治，以雾霾频发的特大城市和区域为重点，以细颗粒物($PM_{2.5}$)和可吸入颗粒物(PM_{10})治理为突破口，抓住产业结构、能源效率、尾气排放和扬尘等关键环节，健全政府、企业、公众共同参与新机制，实行区域联防联控。

由此可见，科学应对雾霾、有效控制 $PM_{2.5}$ 、持续改善大气环境，提高人体健康是社会普遍关注的重大民生问题，同时也是不同领域专业技术人员及科研人员共同面对的话题及共同承担的责任。

1.2 $PM_{2.5}$ 污染现状

$PM_{2.5}$ ，也被称之为可入肺颗粒物，其为空气动力学直径小于 $2.5 \mu m$ 的颗粒物的总称，其直径还不到人的头发丝粗细的 $1/20$ [17]。作为大气环境中一直存在污染物，近年来受到世界各方面的广泛关注。美国国家航空航天局(NASA)2010年9月公布了一张全球空气质量地图， $PM_{2.5}$ 质量浓度分布云图由加拿大达尔豪斯大学的两位研究人员(Kazuhiko 和 Randall V)根据NASA的两台卫星监测仪的监测结果制作，专门展示了世界各地 $PM_{2.5}$ 的质量浓度(图 1-6 所示)。从此图可以看出，北非、东亚及中国 $PM_{2.5}$ 质量浓度较高，中国华北、华东和华中地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度甚至超过 $80 \mu g/m^3$ ，局部超过了撒哈拉沙漠地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度。

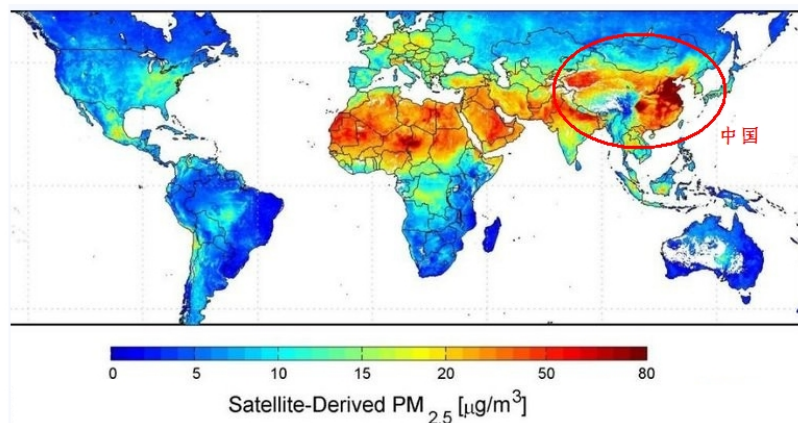


图 1-6 世界范围内不同区域 PM_{2.5} 质量云图分布

2011 年 9 月，世界卫生组织（WHO）发布了 91 个国家 1100 个城市空气质量及排名，其中有我国的 32 个城市，PM_{2.5} 浓度介于 32~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间，排名位于在 812~1058 位之间，其中北京排名 1035 位，即使是空气质量较好的海口，在 WHO 的排名中也居于巴黎之后（图 1-7），我国部分城市 PM_{2.5} 浓度明显高于西方国家，如何有效控制中国不同典型城市 PM_{2.5} 质量浓度存在严峻的挑战。在中国中东部，华中地区，由于工业快速发展，带来的城市化导致空气中的 PM_{2.5} 大大增加，并对人们的健康造成了很大的影响。在这些人口稠密、空气污染严重的地区，人为造成的 PM_{2.5} 空气污染导致每年每平方公里超过 1000 人过早死亡 [18]。从图 1-7 可以清晰的看出，中国兰州、北京 PM_{2.5} 质量浓度普遍高于其他国家的城市。

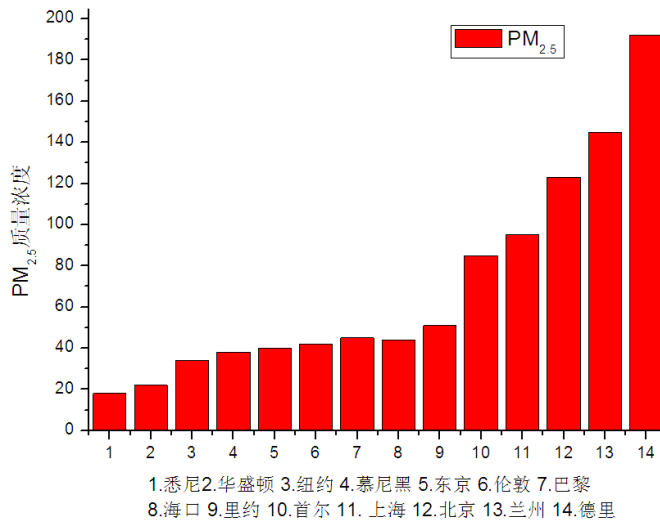


图 1-7 2011 年 WHO 公布的世界主要城市 PM_{2.5} 污染及排名情况

我国城市环境空气颗粒物污染呈现多类型污染的态势，可以分为：传统的煤烟型，主要包括乌鲁木齐、兰州、太原等（尤其是冬季）；煤烟、扬尘和机动车混合型城市，主要包括郑州、石家庄等；复合型城市，主要包括北京、天津、广州等。随着经济的迅猛发展，国外数十年发生的大气污染问题在我国多个城市集中出现，呈现复合、压缩形态。目前我国超过 2/3 的城市空气质量不达标，已进入大范围生态退化和复合性环境污染的阶段。如果不采取有效的控制措施，国内的大部分城市最终都将发展成为复合型的颗粒物污染状态，其中 PM_{2.5} 是表征大气复合型污染的首要污染物。中国不同城市的 PM_{2.5} 质量浓度云图分布如图 1-8 所示，其中京津冀地区以及珠三角地区 PM_{2.5} 质量浓度较高，新疆及青藏高原地区 PM_{2.5} 质量浓度较低，PM_{2.5} 质量浓度分布与地区经济发展，工业结构及人口

数量分布具有一定的相关性。表 1-1 展示了 2005—2010 年我国各省 $PM_{2.5}$ 的平均质量浓度变化规律，图 1-9 展示了中国不同年代不同区域 $PM_{2.5}$ 分布特性，整体而言，随着年代的增加，大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度显著增加。

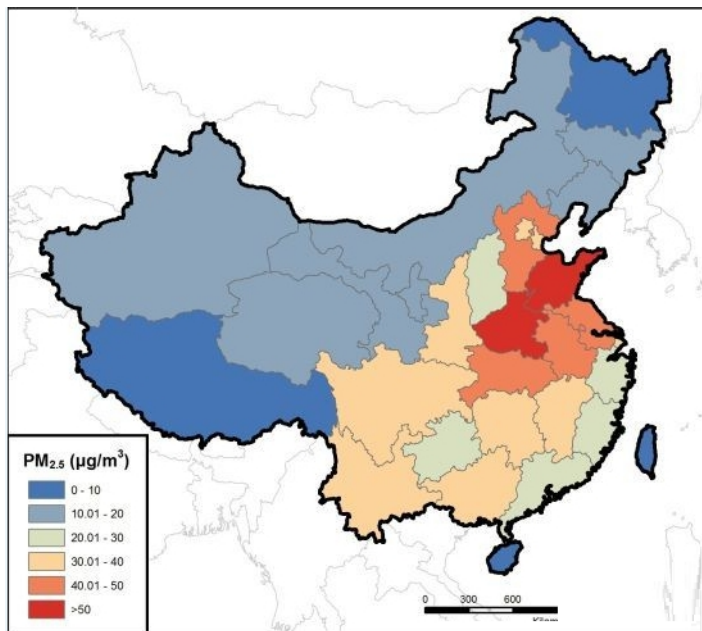


图 1-8 中国空气质量 ($PM_{2.5}$) 地区分布图 (2010 年)

表 1-1 中国各省人口加权年均 $PM_{2.5}$ 浓度

年份	中国各省人口加权年均 $PM_{2.5}$ 浓度 (微克/立方米)					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
山东	45.26	51.78	51.94	46.00	40.44	49.97
河南	46.82	48.53	51.02	47.46	39.53	43.25
河北	41.90	49.23	48.77	46.80	38.37	39.76
江苏	41.03	46.25	48.32	44.52	46.72	44.76
安徽	36.37	36.30	40.65	38.71	34.73	38.46
湖北	39.46	38.72	40.43	40.68	34.59	37.72
四川	37.95	45.95	39.65	40.12	35.34	40.50
广西	41.06	39.43	39.58	38.14	34.27	35.60
天津	30.54	36.62	37.23	38.06	31.12	30.29
北京	31.06	35.88	35.49	38.64	29.54	28.45
江西	32.01	32.57	35.11	33.20	26.87	27.23
湖南	34.06	35.62	35.06	35.59	31.42	31.42
上海	22.94	26.43	31.79	28.10	28.80	23.51
云南	28.50	28.31	30.62	29.70	26.20	26.96
陕西	28.59	31.47	30.33	27.97	26.91	26.73
山西	26.10	30.25	29.62	26.71	22.48	24.07

广东	32.71	29.92	28.84	25.87	23.36	24.88
贵州	25.64	24.58	25.26	24.13	20.84	20.35
浙江	21.62	22.34	24.46	26.12	22.90	21.98
福建	19.64	18.95	21.11	17.59	16.14	15.31
辽宁	18.09	19.84	19.45	22.39	20.06	18.19
甘肃	19.43	18.64	19.00	19.97	18.11	16.98
新疆	16.83	18.86	18.94	20.47	19.31	17.67
宁夏	16.60	16.49	16.18	16.59	15.38	13.69
吉林	12.79	15.41	15.19	18.72	17.20	15.11
青海	13.82	14.30	15.14	16.07	14.24	13.95
内蒙古	11.92	13.18	14.42	14.80	13.20	11.43
西藏	9.85	10.86	9.81	11.00	9.26	9.31
黑龙江	7.53	8.55	9.01	11.35	8.95	9.13
台湾	5.27	4.43	4.76	4.30	4.64	4.20
海南	2.98	2.35	2.90	2.57	2.17	2.54

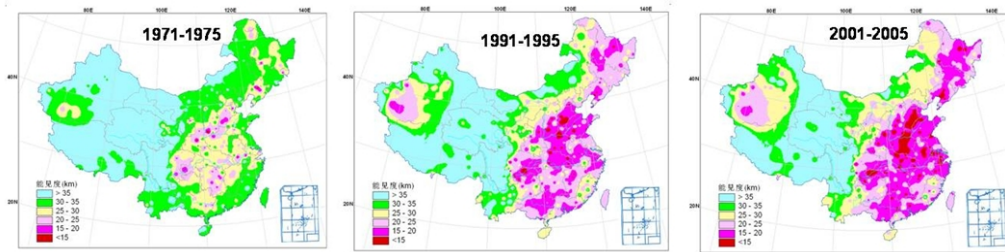


图 1-9 中国不同年代不同区域 PM_{2.5} 分布特性

据 2013 年 1 月 14 日发布《迈向环境可持续的未来中华人民共和国国家环境分析》报告指出[19]，全球 10 大空气污染城市中，中国占 7 个，其中北京、石家庄及太原等 6 个城市位于北方集中供暖地区，其中北京及周边地区普遍较高，高于世界卫生组织的参考标准值（每立方米 10 微克），从而受到世界及全国各族人民普遍关注。北京的雾霾已经成为了必须解决的重大民生问题。北京地区雾霾天气增多最主要的原因是社会石化能源消费增多造成的大气污染物排放逐渐增加。这些污染的主要来源是热电排放、工业尤其是重化工生产、汽车尾气、冬季供暖、居民生活（烹饪、热水），以及地面灰尘。此外，人类活动产生的光化学产物、局地烹饪、汽车尾气等造成的挥发性有机物转化为二次有机气溶胶，以及附近城市的输送，都会使雾霾情况频繁发生。

1.3 PM_{2.5} 相关的国家政策

PM_{2.5} 已经成为政府非常关注，百姓特别关心焦点问题之一。关于国家下发的 PM_{2.5} 政策里程碑事件可以做如下总结：

(1) 2011 年 1 月 1 日环保部发布的《环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的测定重量法》，才首次对 PM_{2.5} 测定进行了规范。

(2) 自 2011 年 11 月 12 日，环保部在《环境空气质量标准》二次公开征求意见时，首次将 PM_{2.5} 纳入国标，并将年均和日均浓度限值分别定为 35μg/m³ 和 75μg/m³

(3) 2012 年 4 月 28 日，环保部近日印发《环境监测“十二五”规划》，环保部还在起草有关 PM_{2.5} 监测仪器的采购和使用指导意见。

(4) 2013 年 1 月 29 日两会期间，温家宝表示，最近的雾霾天气对人们生产生活和身体健康都造成影响，应该采取切实有效的措施，加快推进产业结构和布局调整，推进节能减排，建设生态文明，用行动让人民看到希望，其中 PM_{2.5} 是“十二五”期间大气污染物削减的重要目标参数。

(5) 2013 年 3 月 7 日习主席，谈论以淡定态度面对灰霾，相信政府，有能力控制削减 PM_{2.5}。且将 PM_{2.5} 首次写入《政府工作报告》。

(6) 2013 年 9 月 12 日，国务院发布国务院发布《大气污染防治行动计划》，其内容包括建立环渤海包括京津冀、长三角、珠三角等区域联防联控机制，加强人口密集地区和重点大城市 PM_{2.5} 治理，构建对各省(区、市)的大气环境整治目标责任考核体系。

(7) 2014 年 3 月 5 日，再次将 PM_{2.5} 质量浓度控制写入政府工作报告，将生态文明建设及环境污染控制作为政府的主要任务。

通过对以上里程碑事件的回顾，我们可以清楚的看出中国政府及领导人对控制 PM_{2.5} 的坚定决心。



图 1-10 国家领导人对 PM_{2.5} 质量浓度控制决心

本课题主要探讨了北方集中采暖地区建筑因素对 PM_{2.5} 排放特性的影响，建筑作为影响大气环境 PM_{2.5} 质量浓度的重要因素，很大程度决定大气环境中 PM_{2.5} 质量浓度分布，尤其在供暖季，作为最重要的因素-采暖，对大气环境中 PM_{2.5} 的影响显而易见。2012 年北京出现 12 次大气五级以上严重污染，全部出现在集中供暖季节，2013 年北京出现 16 次大气五级以上严重污染，其中 11 次集中在供暖季节，由此可见北京地区集中供暖过程中排放的污染物是造成 PM_{2.5} 质量浓度增加的重要原因之一。

本课题分别探讨了采暖、炊事及建筑扬尘对大气环境中 PM_{2.5} 质量浓度影响。首先，根据前人对大气环境不同因素对 PM_{2.5} 贡献率源解析研究，通过对比分析，确定建筑因素对大气环境中 PM_{2.5} 排放的贡献率及排放特性影响。通过查阅相关文献，获得不同供暖方式下 PM_{2.5} 的产排污系数，产排污系数为 PM_{2.5} 的减排量计算基础；通过调研北京锅炉规模、种类、分布及燃料用量及类型，最终确定不同燃料类型的锅炉，不同类型建筑（公共和民用建筑）及不同行政区 PM_{2.5} 的排放量；以调研结果为边界条件，通过数值计算，确定供暖季节及非供暖季节北京不同行政区及不同环路 PM_{2.5} 分布图，从而探讨供暖及不同类型锅炉分布对 PM_{2.5} 排放特性的影响。通过对北京周边农村地区的供暖情况调查，得出北京周边采暖燃料类型、分布及所占比例，得出北京农村不同类型燃料对北京地区 PM_{2.5} 的排放量，同时数值实测了北京地区炊事以及建筑工地对北京地区大气环境中 PM_{2.5} 质量浓度分布特性。在已确定不同类型节能目标前提下，计算在提高节能标准、降低供热温度、能源结构调整及清洁能源替代后 PM_{2.5} 的减排量。通过本项目研究，摸清了目前北京建筑因素对 PM_{2.5} 的排放特性影响现状，定量计算了采取一系列应急措施以后 PM_{2.5} 减排量，最终确定未来五年内随着建筑面积的增长，建筑因素对大气环境中 PM_{2.5} 贡献率。**从建筑因素的角度出发，最终提出控制大气环境 PM_{2.5} 质量浓度的合理的建议与策略。**

第二章 建筑因素对 PM_{2.5} 排放特性影响方法学的确定

2.1 源解析方法-建筑因素对 PM_{2.5} 贡献率确定方法

确定建筑因素对 PM_{2.5} 贡献率，一般通过源解析方法。源解析技术是指对大气颗粒物的来源进行定性或定量的研究的技术，PM_{2.5} 的源头解析有助于对大气细颗粒气溶胶的传输特性、污染特性及造成空气气溶胶污染的原因进行科学分析。目前用于解析其来源的方法一般有三类：扩散模型、受体模型和源清单。

1. 扩散模型和受体模型

扩散模型和受体模型是源解析的两种计算模型，源解析技术的发展始于以排放量为基础的扩散模型。扩散模型是一种预测模型，扩散模型可以很好地建立起有组织排放的烟尘源和工业粉尘源与大气环境质量之间的关系，从而为治理有组织排放源提供科学依据，但是扩散模型无法应用于源强难以确定的开放源。随着研究的深入，后来逐步形成了通过对大气颗粒物环境和源样品的化学或者显微分析确定各位污染源对受体贡献的一系列源解析技术[20]。受体模型一般适用于城区尺度，通过在源与受体处测量的颗粒物的化学物理特征，确定对受体有贡献的源和对受体的贡献值。受体模型不依赖于排放源的排放条件、气象、地形等数据，不用追踪颗粒物的迁移过程，避开了扩散模型计算遇到的困难。两者的差异如下表 2-1 所示。

表 2-1 扩散模式和受体模式的比较[21]

比较条件	扩散模式	受体模式
必要的基本资料	排放因子 气象条件 颗粒物的生成，变化，清除过程等	环境与污染物的物理化学资料 (粒度分布，化学组成，形貌，状态等) 颗粒物的区域分布等
可得的结果	排放量预测，环境浓度预测 排放量与环境浓度之间的关系 为符合环境标准确定允许排放量	污染源对环境浓度贡献率的定性定量确定 只能得出集中污染物的贡献率
存在问题	排放量不易测准 排放量的时间变化难以掌握 模式中的跟中假设导致结果不确定性	不知道每个污染源的贡献率 只限于被测颗粒物的地区 不能预测

受体模型大致上可以分为三类：显微镜法、化学法、物理法。其中以化学法的发展最为成熟，有化学质量平衡法（GMB）、因子分析法（FA）、多元线回归（MLR）、混合受体模式等。显微镜法优于电子探针、扫描电镜等分析手段的发展，在对单个颗粒物的研究方面取得了新进展。目前 PM_{2.5} 源解析应用较多的是化学质量平衡法（CMB），此法已被美国环保局（USEPA）推荐作为大气颗粒物

来源的解析的重要方法之一[22]。MB 受体模型通过求解由污染源和大气颗粒物化学组成构建的线性方程组来定量污染源贡献值和贡献率。该方法在建立之后的相当长时间内主要依据无机元素来识别污染源确定其贡献率。其计算方法如下：

设通过采样分析测得的空气中的元素 i 浓度为 d_i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，若已知某排放源 k 所排放颗粒物中元素 i 的含量为 X_{ik} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)，则 k 源在该空气中占有的量 g_k (mg/m^3) 应满足：

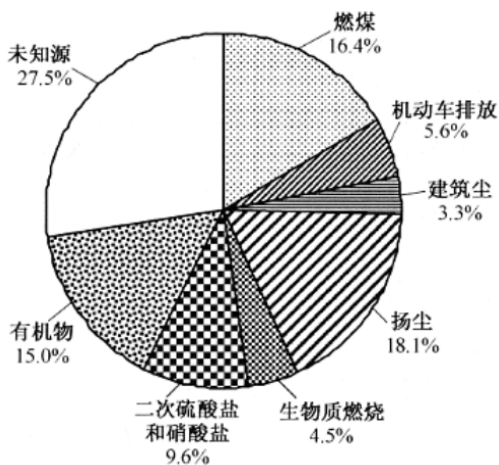
$$d_i = \sum_{k=1}^p X_{ik} \cdot g_k \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{公式 2-1})$$

式中， p -该区域环境中排放源的种类数， m -元素个数选择测定的 m 个元素可建立 m 个方程。只要 $m \geq p$ ，既可以解出一组 g_k ，即各排放源的贡献率大小。

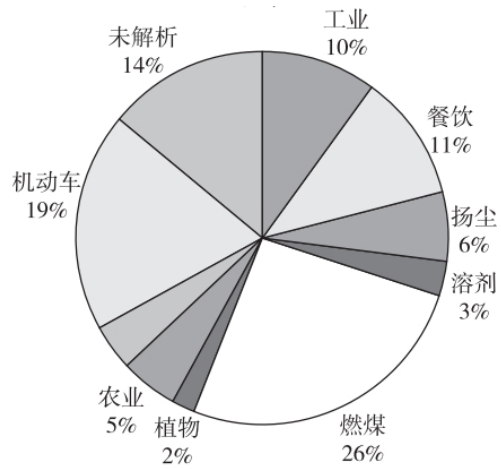
2、源清单

排放源清单是通过观测和模拟大气颗粒物的源排放量、排放特征及排放地理分布等，建立类表模型。建立 $\text{PM}_{2.5}$ 源清单，可将大气污染源分为固定源、移动源和无组织排放源三大类，其中固定源按行业可分为电力、建材、冶金、实话、有色、热力供应与生产等，移动源包括机动车和非道路机械两部分，无组织排放源包括工艺无组织排放源、交通扬尘、施工扬尘、沙荒地及农田裸地扬尘排放。该方法需要详尽的污染源排放清单，且计算过程复杂，排放参数的选取对结果影响很大，如缺乏部分源排放因子，而且不能识别二次形成的颗粒物，估算存在较大的不确定性。

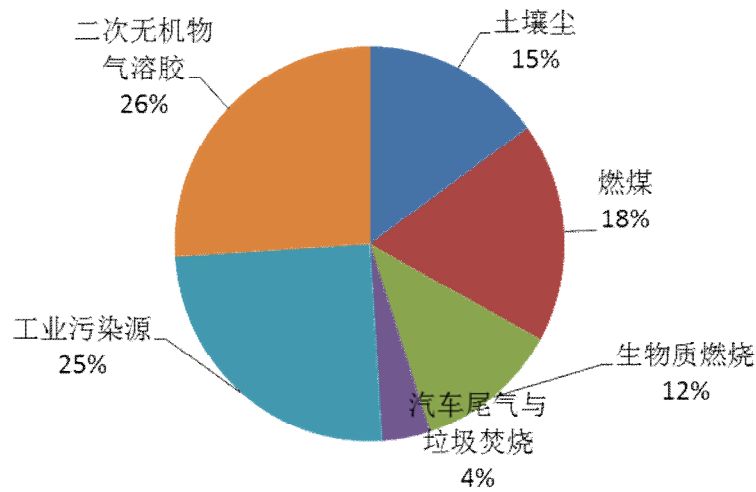
通过查阅不同的文献，得出了不同因素对大气环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率，如图 2-1 所示。



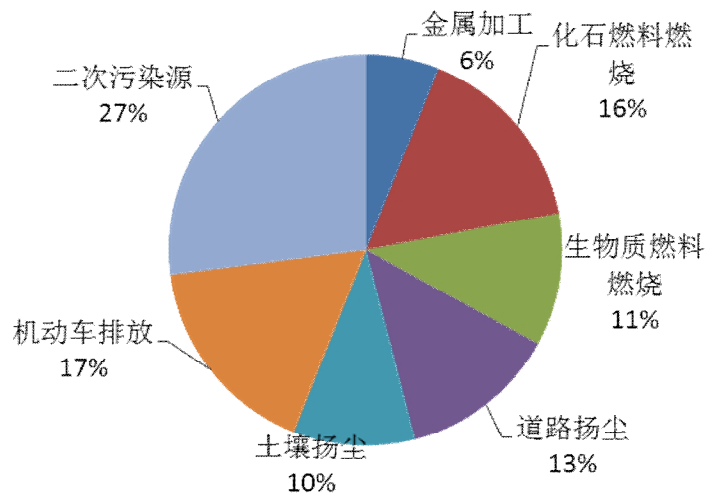
朱先磊，张远航等[23]



杨勇杰, 王跃思等[24]



张仁健等[25]



于领达, 王广付等[26]

图 2-1 不同文献关于 PM_{2.5}源解析结果

2.2 不同类型燃料 PM_{2.5} 一次产排污系数确定方法

2.2.1 确定不同燃料烟尘（TSP）产排污系数

中国产排污系数排放手册对不同燃料污染物排放系数如下表所示。从表 2-2、表 2-3、和表 2-4 可以看出，煤、天然气和油三种不同燃料产生 TSP 排放量。表 2-4 为不同燃料之间的热值当量转化。

表 2-2.燃烧 1 吨煤炭排放的各污染物量 (单位：千克/吨)

污染物	炉 型		
	电站锅炉	工业锅炉	采暖炉及家用炉
一氧化碳 (CO)	0.23	1.36	22.7
碳氢化合物 (C _n H _m)	0.091	0.45	4.5
氮氧化物(以 NO ₂ 计)	9.08	9.08	3.62
烟尘 (TSP)	15	12	8
二氧化硫 (SO ₂)	16.0S*		

表 2-3 燃烧 1 立方米油排放的各污染物量 (单位：千克/米³)

污染物	炉 型		
	电站锅炉	工业锅炉	采暖炉及家用炉
一氧化碳 (CO)	0.005	0.238	0.238
碳氢化合物 (C _n H _m)	0.381	0.238	0.357
氮氧化物(以 NO ₂ 计)	12.47	8.57	8.57
烟尘(TSP)	1.20	渣油燃烧 2.73 蒸馏油燃烧 1.80	0.952
二氧化硫 (SO ₂)	20S*		

表 2-4 燃烧 1 百万立方米燃料气排放的各污染物量

污染物	炉 型		
	电站锅炉	工业锅炉	采暖炉及家用炉
一氧化碳 (CO)	忽略不计	630	630
碳氢化合物 (C _n H _m)	忽略不计	忽略不计	忽略不计
氮氧化物(以 NO ₂ 计)	6200	3400.46	1843.24
烟尘(TSP)	238.50	286.20	302.0
二氧化硫 (SO ₂)	630		

表 2-5 不同类型能源热值当量转化关系

序号	能源类型	1 标准量	折算为标准煤量
1	电	1 千瓦时	0.4040 千克
2	燃气 (天然气)	1 立方米	1.2243 千克
3	燃气 (焦炉煤气)	1 立方米	0.5714-0.6143 千克

4	燃气（其他燃气）	1 立方米	0.3570 千克
5	集中供热量	1 百千焦	0.1229 千克
6	煤	1 千克	0.7143 千克
7	液化石油气	1 千克	1.7143 千克
8	汽油	1 千克	1.4714 千克
9	煤油	1 千克	1.4714 千克
10	柴油	1 千克	1.4571 千克

以油做燃料，产生 1t 标准煤（tce）的热值当量，经计算排放烟尘量为 0.8088kg/tce；以天然气作为燃料，产生 1t 标准煤（tce）的热值当量，经计算排放烟尘量为 0.24296kg/tce；以煤作为燃料，产生 1t 标准煤（tce）的热值当量，经计算排放烟尘量为 11.12kg/tce。

2.2.2 不同燃料产生的烟尘质量粒径分布

为了研究不同燃料，不同燃烧放下颗粒物的粒径尺寸分布，本课题参考了美国环保局的部分数据及欧洲环保局的局部分数据，同时参考大量的文献，将不同燃料及不同燃烧方式下 PM_{2.5} 质量百分比整理如下：

表 2-6 煤燃烧过程中颗粒物尺寸分布（相对于 TSP）

来源	安装类型	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP
USA,1999a[27]	家用火炉	16%	90%	100%
EPA,1998a[28]	小锅炉（大负荷）	14%	37%	100%
	小锅炉（小负荷）	25%	41%	100%
	干式硬煤煤粉锅炉	6%	23%	100%
	湿式硬煤煤粉锅炉	21%	37%	100%
	褐煤煤粉燃烧锅炉	10%	35%	100%
Moisio,1999[29]	煤粉硬煤燃烧	6%	52%	100%
	流化床硬煤锅炉	5%	26%	100%

表 2-7 工业燃烧过程中不同燃料产生颗粒物尺寸分布（相对于 TSP，欧洲 RAINS 模型）

燃料	PM _{2.5}	粗颗粒	PM ₁₀	>PM ₁₀	TSP
散煤（炉条）	7%	13%	20%	80%	100%
散煤（流化床）	5%	21%	26%	74%	100%
褐煤（煤粉）	10%	25%	35%	65%	100%
硬煤（流化床）	6%	17%	23%	77%	100%
衍生煤	45%	34%	79%	21%	100%
生物质燃料	77%	12%	89%	11%	100%

天然气	23%	15%	38%	62%	100%
-----	-----	-----	-----	-----	------

表 2-8 发电厂不同燃料产生颗粒物尺寸分布（相对于 TSP，欧洲 RAINS 模型）

燃料	PM _{2.5}	粗颗粒	PM10	>PM10	TSP
散煤（炉条）	14%	23%	37%	63%	100%
散煤（流化床）	5%	21%	26%	74%	100%
褐煤（煤粉）	10%	25%	35%	65%	100%
硬煤（流化床）	6%	17%	23%	77%	100%
衍生煤	45%	34%	79%	21%	100%
生物质燃料	77%	12%	89%	11%	100%
天然气	23%	15%	38%	62%	100%

表 2-9 住宅工厂不同燃料产生颗粒物尺寸分布（相对于 TSP，欧洲 RAINS 模型）

燃料	PM _{2.5}	粗颗粒	PM10	>PM10	TSP
散煤（火炉，熔炉）	13%	77%	90%	10%	100%
散煤（大型锅炉）	7%	13%	20%	80%	100%
衍生煤	45%	34%	79%	21%	100%
生物质（火炉，锅炉）	93%	3%	96%	4%	100%
生物质（大型锅炉）	77%	12%	89%	11%	100%
天然气	60%	30%	90%	10%	100%

表 2-10 关于重油燃烧过程颗粒物尺寸分布（相对于 TSP）

来源	分类	PM _{2.5}	PM10	TSP
EPA,1998a[28]	大型锅炉	52	71%	100%
	工业锅炉	56%	86%	100%
	民用锅炉	23%	62%	100%
Ganley,,2002[30]	电厂锅炉	83%	20%	100%
	工业锅炉	54%	79%	100%
	民用锅炉	67%	83%	100%
Lützeke,1987[31]	工业锅炉	76%	92%	100%
Berdowskiet,al,1997[32]	电厂和工业锅炉	75%		

表 2-11 关于重油燃烧过程颗粒物尺寸分布（相对于 TSP）

来源	分类	PM _{2.5}	PM10	TSP
EPA,1998a[28]	大型锅炉	52%	71%	100%
	工业锅炉	56%	86%	100%

	民用锅炉	23%	62%	100%
Ganley,2002[30]	电厂锅炉	83%	20%	100%
	工业锅炉	54%	79%	100%
	民用锅炉	67%	83%	100%
Lützeke,1987[31]	工业锅炉	76%	92%	100%
Berdowski et.al,1997[32]	电厂和工业锅炉	75%		

表 2-12 关于清油燃烧过程颗粒物尺寸分布（相对于 TSP）

来源	分类	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP
EPA,1998a[28]	家用锅炉	42%	55%	100%
	工业锅炉	12%	50%	100%
APEG,1999[33]	电厂锅炉	43%	100%	100%
	工业锅炉	25%	100%	100%
	民用锅炉	67%	100%	100%
Berdowskiet.al,1997[32]	家用锅炉	60%	85%	100%

通过以上表格可以看出，不同燃料所产生的烟气中颗粒物的粒径分布不同；同一种燃料，燃烧方式不同，所产生的颗粒物的粒径分布也不同；对于同一种燃料，使用不同锅炉产生的颗粒物的粒径分布也有所差别。总之颗粒物的粒径分布与燃料类型、燃料的化学性质、燃料的物理性质、燃料形态、燃烧条件、锅炉的特征密切相关。本课题取不同类型燃料的 PM_{2.5} 粒径分布平均值，作为本课题的计算参考依据。通过计算煤燃料燃烧烟气中产生 PM_{2.5} 质量百分比为 14%，天然气燃烧过程中烟气所含有的 PM_{2.5} 质量百分比为 32%，油燃烧过程中烟气所产生 PM_{2.5} 质量百分比为 50%。通过以上分析和计算，在考虑大气二级排放标准的前提下，从而得出不同类型燃料 PM_{2.5} 一次排放因子分别为：煤—1.56kg/tce、天然气—0.08kg/tce 和油—0.4044kg/tce。其中国外文献也有提到 PM_{2.5} 的一次排放因子，其中 Ganley [30]于 2012 年提出住宅不同燃料，包括褐煤、高级硬煤、中级硬煤，低级硬煤的 PM_{2.5} 的排放因子为 0.07Kt/PJ，0.06Kt/PJ，0.025Kt/PJ，0.1Kt/PJ；Winiwarter[34]等人提采暖锅炉及壁挂炉的 PM_{2.5} 的一次排放因子分别为 0.075 Kt/PJ，0.122 Kt/PJ，通过不同单位的相互转化，本文计算得出不同燃料的热值当量排放因子与上述文献所提出的排放因子相当。

2.3 不同类型建筑节能目标确定方法

2.3.1 公建节能目标确定方法

通过使用 TRNSYS 能耗模拟软件,对具有典型能耗特征的各类公共建筑进行详细的建模、计算模拟分析,得出各类公共建筑在合理的经济条件、技术条件下的节能目标,再按照公共建筑分布特征加权,得到未来北京地区公共建筑整体节能目标,从而为进一步计算公共建筑节能量以及 $\text{PM}_{2.5}$ 减排量提供基础数据 [34]。公共建筑节能目标确定过程主要涉及得到的方法包括:建筑全寿命周期成本 LCC (Life Cycle Cost) 分析方法,价值工程分析方法,静态投资回收期分析方法等,通过此三种方法确定投资增量与节能率的关系,最终确定最佳的节能目标,以下是对上述方法的简单介绍:

u 建筑全寿命周期成本分析方法

建筑全寿命周期成本分析方法是指一种贯穿工程项目全生命周期,包括工程目前期、建设期、使用期和翻新与拆除期等阶段总造价最小化的方法,建筑全寿命周期成本分析方法是一种可审计跟踪的工程成本核算方法。它既可以被看作工程项目投资决策的一种分析工具,或一种用来选择决策备选方案的数学方法,也被作为计算工程项目整个寿命期的所有成本(直接、间接、社会和环境成本等)确定设计方案的一种技术方法。依据定义,我们可以看出,建筑全寿命周期成本分析方法做为一种先进的管理方法有着其自己鲜明的特点:首先,它研究的是工程项目整个寿命周期阶段,以建设项目整个寿命周期总造价的最小化为目标。分析范围囊括了决策阶段、设计阶段、实施阶段、竣工验收阶段和运营维护阶段;其次,全寿命周期工程造价管理有寿命周期成本分析和管理的两大核心内容,建筑寿命周期成本分析的主要作用是为管理的各个阶段提供决策依据,是方案选择的主要工具。建筑寿命周期成本分析就是在整个阶段对寿命周期成本动态的详细的分解,以达到寿命周期成本最小化的目标。此方法主要用来评价建筑全生命周期不同阶段的成本大小,以及提高共建节能目标以后增加的成本量。

u 价值工程分析方法

价值工程分析是利用产品成本结构与产品功能结构的比值关系来寻找降低成本、提高成本效能比率的途径,从而改进产品或工艺设计的有效方法。价值分析的核心是功能分析。作为一项技术经济的分析方法,价值工程做到了将技术与经济的紧密结合,此外,价值工程的独到之处还在于它注重与提高产品的价值、注重研制阶段开展工作,并且将功能分析作为自己独特的分析方法。此方法主要用于确定提高建筑节能目标最佳的收益价值。

u 静态投资回收期分析方法

静态投资回收期（简称回收期），是指以投资项目经营净现金流量抵偿原始总投资所需要的全部时间。它有“包括建设期的投资回收期（PP）”和“不包括建设期的投资回收期（PP）”两种形式。其单位通常用“年”表示。投资回收期一般从建设开始年算起，也可以从投资年开始算起，计算时应具体注明。

静态投资回收期是不考虑资金的时间价值时收回初始投资所需要的时间，应满足下式：

前 t 项之和（CI-CO）的第 t 项=0

式中：CI—现金流入，CO—现金流出； P_t —第 t 年的净收益， $t=1,2,\dots,P_t$ ； P_t —静态投资回收期。计算出的静态投资回收期应与行业或部门的基准投资回收期进行比较，若小于或等于行业或部门的基准投资回收期，则认为项目是可以考虑接受的，否则不可行。此方法主要用于对提高建筑节能标准投资、效益及回收期的定量评估。

建筑能耗的合理评估应从项目整个流程进行，针对建筑物寿命期进行能耗成本评估，运用现金流，考虑建筑寿命期、建材生产、准备、设计 施工、运行、拆除废料处置直至资源再循环。能耗成本通过建立经济效益分析模型来考察建筑总能耗成本，并结合实例计算结果，运用造价和经济原理从技术、经济和管理角度分析节能投入前后建筑物寿命期费用的变化，得出了系列结论，从而确定公共建筑的最佳合理的节能目标，进一步为建筑能耗计算以及 $PM_{2.5}$ 减排量奠定基础。

2.3.2 住宅建筑节能目标确定方法

住宅建筑能耗分布散度较大，同时不同年代建筑能耗差异也较大。确定住宅建筑节能目标的时候需确定不同年代建筑的权重，最终得出不同年代民用建筑权重系数。权重系数确定方法可分为三大类：一类为主观赋权法，一类为客观赋权法，一类为主客观综合集成赋权法。主观赋权评估法采取定性的方法由专家根据经验进行主观判断而得到权数，然后再对指标进行综合评估。如层次分析法、专家调查法，Delphi 法，模糊分析法，二项系数法，环比评分法，最小平方法等。其中层次分析法(AHP 法)是实际应用中用得最多的方法[35]，它将复杂问题层次化，将定性问题定量化。它是一种整理和综合人们主观判断的客观分析方法，也是一种定量与定性相结合的系统分析方法，适合于具有多层次结构的多目标决策问题或综合评价问题的权重。客观赋权法除了常用的最小二乘法和本征向量法以外，最大熵技术法、拉开档次法、熵权信息法、均方差法、变异系数法、离差最大化法、简单关联函数法等方法也为研究者亲睐。这类方法的突出优点是权系数客观性强，但没有考虑到决策者的主观意愿且计算方法大都比较繁琐，在实际情况中依据上述原理确定的权系数最重要的指标不一定具有最大的权系数。得出

的结果会与各属性的实际重要程度相悖，难以给出明确的解释。为此，针对主观赋权法和客观赋权法的优缺点，学者又提出了主客观综合集成赋权法。目前这类方法主要是将主观赋权法和客观赋权法结合在一起使用，从而充分利用各自的优点。所以这类方法在使用起来一是要求样本数据量较大，二是操作繁琐。在本课题的研究中住宅建筑节能目标选用层次分析法所以本课题所采用主客观综合集成赋权法。本课题首先对北京地区不同年代住宅建筑进行分类筛选，确定其建筑节能等级（非节能、30%节能、50%节能、65%节能），然后对节能等级数量面积进行统计，结合北京地区经济条件、技术条件以及改建建筑可行性条件，定量评估北京现有建筑能达到建筑节能的目标，从而进一步得出不同类型节能建筑所占的比例，定向计算北京住宅建筑节能改造，提高节能建筑标准等措施，对能耗减少量，从而进一步计算 $PM_{2.5}$ 的削减量。

2.4 空间数值模拟方法

2.4.1 ARCGIS 空间分配数值计算法

Arcgis 是 ESRI 开发的新一代 GIS 软件，是世界上应用广泛的 GIS 软件之一。由于其特殊的插值功能、栅格数据的空间分析功能、矢量数据的空间分析功能及空间数据的可视化功能被应用于流行病学、生物学、气象、地质及环境等不同行业[36]，此软件能够深入的挖掘空间数据信息，以图形的形式给人以直观表达。除了形象表达以外，Arcgis 还具有强大的空间统计能力，通常使用此软件研究空间自相关性（Spatial Autocorrelation），分析空间分布的模式，例如聚类（cluster）或离散（dispersed）。Arcgis 插值法包括反距离插值（Inverse Distance Weighted, IDW），样条插值（Spline）和克里格插值（Kriging）。本课题插值采用克里格插值数值模拟北京周边农村地区采暖因素对北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 的质量浓度的空间分布。Arcgis 软件首先对已知数据进行分析和挖掘，检验其分布特征（正态分布或偏态分布），变化趋势以及各向异性等特点，然后根据适当的方法插入数据，最后选择模型合适的模型进行表面预测预测，最终得到计算结果。计算结果可以以图片的形式及数据统计的形式给出。本课题研究过程中运用的数字高程计算模型（Digital Elevation Model）进行有效的数值计算。

2.4.2 FLUNET 空间数值模拟法

本课题采用 FLUENT 商业软件对连续性方程，动量方程以及湍流方程进行求解，FLUENT 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，而且基于网格节点和网格单元的梯度算法具有稳定性好，适用范围广，精度高特点[37]。一般来

说，比较专业化的 CFD 分析软件主要有 FLUENT, PHOENICS, STAR-CD, CFX, ANSYS 等。这些软件各具优点，但总体而言 FLUENT 是最为专业化的，也是功能最为强大的 CFD 分析软件，在全球众多的 CFD 软件研究开发商中，FLUENT 软件独占 40% 以上的市场份额，具有绝对的市场优势。本课题通过对北京地区流场进行的模拟计算，得出北京地区风环境气流分布特性，在流场特性的基础上加载 DPM 模型，模拟 PM_{2.5} 质量浓度分布，从而得出不同边界条件下北京不同行政区域的 PM_{2.5} 云图分布。本课题计算过程采用分离式求解方法，采用 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合，它是属于压力修正法的一种，该方法由 Patnakar 与 Spalding 于 1972 年提出的。SIMPLE 算法的基本思想为：对于给定的压力场，求解离散形式的动量方程，得出速度场。因为压力场是假定的或不精确的，这样，由此得到的速度场一般不满足连续性方程，因此，必须对给定的压力场加以修正。根据修正后的压力场，求得新的速度场。然后检查速度场是否收敛。若不收敛，用修正后的压力值作为给定的压力场，开始下一层次的计算，如此反复直到获得收敛解。压力和动量离散全部采用二阶迎风模型，湍流动能 k 和耗散率 ω 的离散选择二阶迎风格式。本研究采用 T-grid 及 Hypermesh 对本文模型划分网格，对于计算模型近壁面区域进行处理，尤其是近壁面区域的网格完全包括粘性边界层，从而对边界层区域流场的分布细节特性进行精确的描述。通过 2800000, 5600000 和 8400000 网格数目分别进行计算，发现 5600000 网格数量既能够满足计算精度要求，同时计算效率也较高，所以最终网格数目选择 5600000。扩散项采用中心分差方法进行离散，对流项采用二阶迎风模型进行计算。当全局质量和动量残差降到原来的 10^{-5} 的时候，外部迭代过程停止。

本文采用的是离散相模型（Discrete Phase Model; DPM）。DPM 遵循欧拉-拉格朗日方法，流体相被看作连续相从而求解时均采用纳维—斯托克斯方程（Navier-Stokes equations），而离散相是通过跟踪通过流场的大量颗粒来进行求解的。DPM 的一个基本假设就是离散相所占的体积分数较小。对于大气环境中 PM_{2.5} 颗粒物，其体积分数低于 15%，符合 DPM 的假设，因而 DPM 对其适用。由于本课题只探讨 PM_{2.5} 一次生产及分配特性，不考虑颗粒物凝并过程，采用 DPM 模型能够很好的描述颗粒物随着连续流场的扩散以及分布特性[38]。边界条件来源于课题调查和采集多种不同的数据（锅炉特征数据、建筑工地分布数据、人口密度分布数据等），从而探讨不同建筑因素对大气环境空间的 PM_{2.5} 变化信息，分布特征。

表 2-13 DPM 模型相关考虑项目

项目	采用的方法
颗粒相模拟所采用的模型	离散相模型（DPM）
计算中考虑的颗粒物所受到的附加力	重力、布朗力、Saffman 升力、热泳力

研究颗粒物的湍流扩散所使用的模型	随机轨道模型 (Stochastic Tracking Model)
确定空气瞬时流速的模型	离散型随机步行 (DRW) 模型
连续相和离散相之间的作用	单向耦合, 仅考虑连续相对离散相的作用。
模型假设	<ol style="list-style-type: none"> 1、所有的颗粒物均为球形固体颗粒; 2、颗粒物触碰到壁面不会反弹; 3、在颗粒物沉积的过程中, 不考虑颗粒物的凝结。
稳态/非稳态	稳态颗粒轨道模拟

第三章 北京地区供热因素对 PM_{2.5} 排放特性影响

3.1 前言

供热作为重要的建筑因素,对大气环境中 PM_{2.5} 排放及污染特性具有重要的影响。据不完全统计,2012 年北京出现 12 次大气五级以上严重污染,全部出现在集中供暖季节,2013 年北京出现 16 次大气五级以上严重污染,其中 11 次集中在供暖季节,由此可见北京地区集中供暖过程中排放的污染物是造成 PM_{2.5} 质量浓度增加的重要原因之一。同时供热能耗占据北京地区整体建筑能耗的 50% 以上,如图 3-1 所示[39]。据田谧等人对京津冀地区霾污染过程大气 PM_{2.5} 及前体物变化特征研究得出以下结论[40]:2012 年北京和天津出现霾污染天的次数分别达 99 和 84 次;霾天分布冬季>秋季>夏季>春季;霾污染主要表现在 PM_{2.5} 等细粒子污染。(2)大气中 PM_{2.5} 浓度变化表现出秋冬季高,春夏季低的变化趋势;日变化呈早晚双峰型,冬季变化幅度最大。2012 年北京大气 PM_{2.5} 超标 169 天,年均值为 83 μg/m³;天津大气 PM_{2.5} 超标 111 天,年均值为 66 μg/m³;兴隆大气 PM_{2.5} 超标 54 天,年均值为 36 μg/m³,从而进一步验证了采暖因素对大气环境 PM_{2.5} 质量浓度具有重要影响。黄丽坤等人[41]对哈尔滨市采暖与非采暖期大气颗粒物污染特性进行研究,结果表明:TSP 和 PM₁₀ 在 12 月、1 月、3 月和 4 月均超标,而在非采暖期均达到国家二级标准;整个采样期 PM₁₀/TSP、PM_{2.5}/TSP、PM_{2.5}/PM₁₀ 的平均值分别为 63.0%、43.9%、70.1%,而且 PM_{2.5}/TSP 和 PM_{2.5}/PM₁₀ 在采暖期的比率均大于非采暖期;Ca、K、Mg、S、Pb 和 Zn 等元素在采暖期明显高于非采暖期,而 Al、Fe、Na、Si 在采暖后要高于采暖期;PM₁₀ 及 PM_{2.5} 中 EC、OC 及 OC/EC 均为采暖期高于非采暖期,且 OC 高于 EC,同时 EC、OC 在 PM_{2.5} 中含量较 PM₁₀ 大,采暖对大气环境 PM_{2.5} 质量浓度影响重大。李凯[42]等人对西安市采暖期 PM_{2.5} 污染状况及其与气象因子的相关性进行分析,结果显示:采暖期 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的质量浓度显著高于非采暖期,平均是非采暖期的 1.85 和 1.46 倍,采暖期 PM_{2.5} 在 PM₁₀ 中的比重也高于非采暖期。姚青[43]等人探讨了采暖对天津近地层 PM_{2.5} 污染特征的影响,结果表明:PM_{2.5} 质量浓度采暖期明显高于非采暖期,非采暖期逐时变化呈单峰态。通过以上研究结果表明,研究供热情况对北京大气环境 PM_{2.5} 控制具有重要影响,因此本章对北京及周边农村地区供热情况进行调查,得出北京及周边地区的供热概况,同时调查结论为后续的计算和数值模拟提供了边界条件,作为本课题最主要工作,就是统计北京地区锅炉的数量、燃料类型、用能量及分布情况,同时统计北京周边地区供热燃料类型及用量,从而为进一步探讨供

热因素对 PM_{2.5} 排放特性影响提供基础数据。

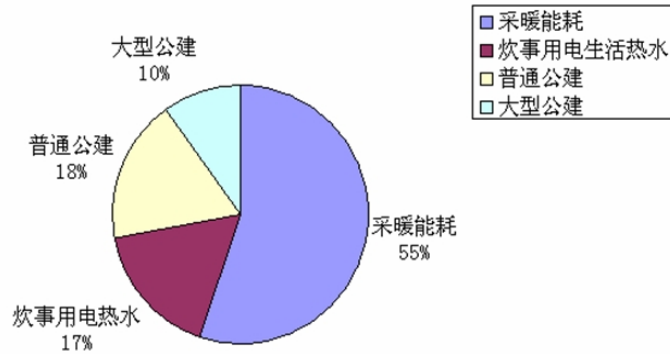


图 3-1 北京地区整体建筑能耗的比例分布

3.2 北京地区锅炉调查统计结果

3.2.1 北京地区锅炉数量及分布概况

北京城六区和远郊十区共有锅炉数量 3000 余座。城六区供热单位数量为上千个，占北京市供热单位总数量的近 70%。远郊区县供热单位数量为约 500 个，占北京市供热单位总数量的 30% 左右。

3.2.2 供热单位燃料情况

北京市的城市管网集中供热，根据燃料类型的不同可分为，燃煤锅炉房、燃气锅炉房、燃油锅炉房、电及其它燃料锅炉房，其中以燃煤和燃气锅炉房为主。全市 3000 余座锅炉房中，燃气锅炉房约 2000 座，约占全市总数的 65%，燃煤锅炉房占全市总数的 23%，剩余油及其它比例之和约为 12%。

从上面的数据可以看出，城六区主要以燃气锅炉房为主，而远郊区燃煤锅炉房占的比例仍然很大，尤其是大型锅炉房仍然以煤为主要燃料。另外，城六区小型锅炉房数量依旧较多，具有整合空间。

3.2.3 燃料分布情况

北京市的锅炉房仍然以燃煤和燃气两种燃料为主，其中燃煤锅炉房主要集中在远郊区县，燃气锅炉房主要集中在城六区，燃油锅炉房以城六区为主，电锅炉房呈零星分布。

城六区燃气锅炉房面积占绝大多数，比例最大为西城区，约占 91%，远郊区县燃煤锅炉房面积占绝大多数，比例最大为平谷、怀柔、密云燃煤锅炉房比例为 100%。

全市各区县燃煤锅炉房供热面积约 20 万平方米。东城、西城燃煤锅炉房为零。

3.2.4 锅炉房能耗情况统计

在近年，每平方米的单位能耗越来越被国家重视，并且作为一个重要指标来衡量各地的综合能源利用率。

远郊区县能耗高于城六区，且城六区的能源主要是燃气，其次是燃煤，远郊区县绝大部分是燃煤。其中城六区平均能耗为 14.7 千克/平方米，远郊区县能耗为 18.4 千克/平方米。能耗最低的区县石景山平均能耗值 11.2 千克/平米。根据统计图可知，能耗主要集中在远郊区县的燃煤锅炉房和城区的燃气锅炉房，与锅炉房的分布保持一致。

燃油锅炉房单耗最高，为 80.9 千克/平方米（燃油锅炉房数量仅占全市锅炉房总数的 0.09%）。电及其它锅炉房单耗最低，为 8.2 千克/平方米（电及其它锅炉房数量仅占全市锅炉房总数的 0.03%）。城六区燃气锅炉房单耗最低为 11.8 千克/平米，远郊区县电及其它锅炉房单耗最低为 8.2 千克/平米。

全市各区县能耗 639 万吨标准煤，海淀、朝阳、丰台、昌平这四个区县所消耗的能耗占全市总量的 54.1%。

3.2.5 全市不同类型建筑供热面积统计

全市公建面积中，城六区与远郊区县相比，非节能面积所占的比例要大于远郊区县，远郊区县共建面积中，节能面积比例大于非节能。

全市住宅面积中，总体上节能面积远大于非节能面积，二步节能面积所占比例最大，占全市住宅总面积的 33.6%，非节能面积上远郊区县所占比例小于城六区。

3.2.6 锅炉房地理位置分布情况

按照地理位置来划分，锅炉房分布基本比较平均，就不同燃料而言区别较大，燃煤锅炉房主要分布在五环以外的远郊区县，燃气锅炉房主要分布在五环以内的城区，燃油和电锅炉房分布较平均。

二环以内无燃煤锅炉，二环至三环内，三环至四环内，燃煤锅炉数量最少，五环至六环内，六环以外燃煤锅炉所占比例较大，对于燃油锅炉而言，二环内燃油锅炉所占比例最高月为 22%左右，其次为二环至三环约为 11%左右，其余环路燃油锅炉所占比例较少，不足 5%，燃电及其他锅炉所占比例整体较少。

从锅炉分布特性可以看出，城六区内燃煤锅炉数量较少，大部分为燃气锅炉，而京外十区，燃煤锅炉较多，燃气锅炉较少；对于燃油锅炉，城六区燃煤锅炉较多，而京十区燃油锅炉较少；不同行政区锅炉数量，以及燃料类型，分布有所差

异。从环路而言，五环内燃气锅炉较多，燃煤锅炉较少，而五环外，燃煤锅炉较多，燃气锅炉较少。其中燃油锅炉主要分布在五环内。仅仅考虑供热为 $PM_{2.5}$ 输入源的前提，可以发现锅炉的分布特征对北京地区 $PM_{2.5}$ 浓度分布有重要影响，其数值模拟结果见第六章。

3.2.7 采暖因素产生的 $PM_{2.5}$ 总量

由上述分析可以看出北京锅炉燃料不同燃料分别为：煤用量折合标准煤为 3696339tce，油用量折合标准煤为 314805tce，而天然气用量折合标准煤为 2334328tce，年产生 $PM_{2.5}$ 约为 5754.46t，127.31t 和 181.49t，整体而言，煤是产生 $PM_{2.5}$ 重要来源。

3.3 北京周边农村地区采暖调查统计结果

对北京周边农村供热情况进行调查，统计发现不同种类的燃料所占比例分别为：散煤 42.1%、型煤为 37.1%、电力为 9.8%、天然气为 8.6%、秸秆生物质能为 2.4%，其中电力供暖方式又分为电暖气和空调，天然气供暖以壁挂炉为主，散煤燃烧以传统的煤炉和土暖气为主，而型煤则以小型型煤锅炉为主，此调研结果与杨旭东等人 2006 年对北京房山区的典型农村能源消耗调研结果相似。

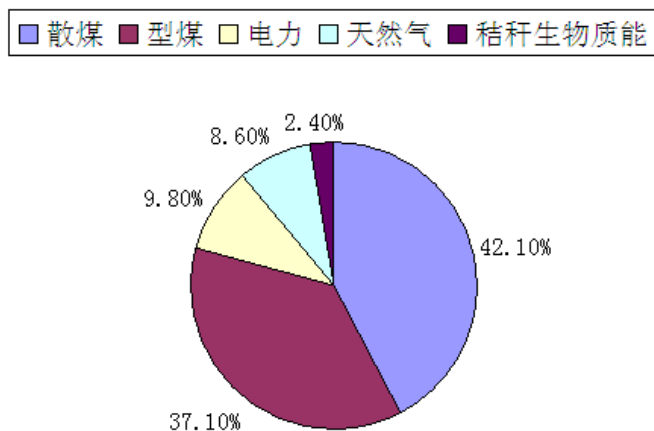


图 3-19 北京周边农村地区供热类型比例

根据 $PM_{2.5}$ 产排污系数核算北京郊区不同供热燃烧对大气环境中 $PM_{2.5}$ 的贡献比例，其中散煤燃烧所占比例为 51.10%，型煤燃烧所占比例为 41.10%，秸秆生物质能燃烧所占比例为 6.8%，电力和天然气共计所占比例为 1%。

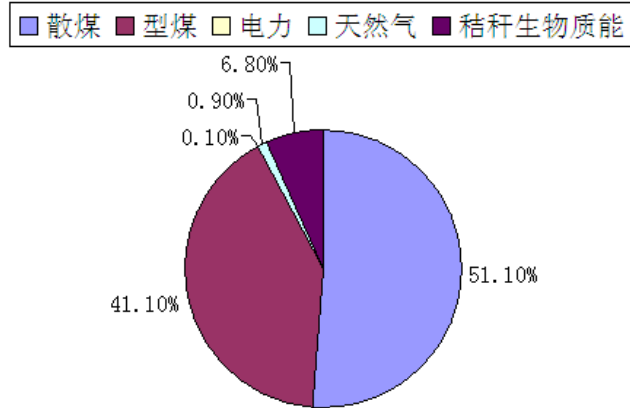


图 3-20 北京周边地区不同类型供热燃料对 $PM_{2.5}$ 贡献率

据文献统计[44]，北京周边地区农村平均每人每年的耗煤量为 1.17t/人，根据中国统计局官方数据北京周边农村约有人口 232 万[45]，从而可以粗略估计煤燃烧量为 271 万吨左右，根据上述统计比例可以计算出电力、天然气及秸秆生物质能折合标准煤的量，通过产排污系数整体计算北京周边农村地区 $PM_{2.5}$ 产生量约 2320t 左右。

3.4 小结

通过前三节计算结果可以得出以下结论：

- (1) 对于北京地区集中采暖过程，其中煤燃烧对北京地区的大气环境 $PM_{2.5}$ 贡献率较大，其贡献值约为 5754.46t，控制北京地区的燃煤锅炉数量级燃料用量，对于减少一次 $PM_{2.5}$ 的贡献率具有重要作用。
- (2) 北京地区燃煤锅炉京六区较少，远郊区县十区燃煤锅炉数量较多，因此远郊区县的燃煤锅炉为重点控制对象；通过分析可知，四环内燃煤锅炉较少，四环外燃煤锅炉数量较多，对于区域控制而言，加强四环外燃煤锅炉控制具有重要意义。
- (3) 非节能公建、节能公建、非节能住宅、一步节能住宅、二步节能住宅及散步节能住宅对北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 的贡献率分别为 960.46t、1310.61t、1330.97t、926.14t、1033.83t、492.50t。相对于其他行政区而言，海淀、朝阳、丰台三个行政区对北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 贡献率较高，石景山和门头沟对北京地区大气环境 $PM_{2.5}$ 贡献率较低。
- (4) 北京周边农村地区采暖燃料不同种类的燃料所占比例分别为：散煤 42.1%、型煤为 37.1%、电力为 9.8%、天然气为 8.6%、秸秆生物质能为 2.4%；不同燃料的对大气环境中 $PM_{2.5}$ 的贡献率分别为散煤燃烧所占比例为 51.10%，型煤燃烧所占比例为 41.10%，秸秆生物质能燃烧所占比例为 6.8%，电力和天然气共计所占比例为 1%；北京周边农村地区采暖对大气环境中 $PM_{2.5}$ 总量贡献为 2320t。
- (5) 集中采暖和北京周边农村地区散煤燃烧对北京大气环境中 $PM_{2.5}$ 的一次来

源贡献量共计 8400t 左右，采暖因素对北京地区大气环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 一次排放具有较大影响。

第四章 炊事对北京地区 PM_{2.5} 排放特性影响

4.1 前言

炊事作为重要的建筑因素之一，影响大气环境中 PM_{2.5} 排放总量。中国饮食加工中，煎、炒、烹、炸占有很大的比例，因此中式厨房中的油烟很大，厨房烹饪过程中产生的烟尘也是空气污染物来源之一。炊事产生的烟尘颗粒，粒径范围小，且经过高温处理后，含有多种有毒有害的化学，对人体危害性较大，因此研究厨房炊事对大气环境中 PM_{2.5} 排放特性影响具有重要意义，同时人们在厨房度过的时间不可避免，更增加人体对厨房环境中 PM_{2.5} 暴露程度。

厨房产生的油雾、烟气组分复杂，主要由醛、酮、烃、脂肪酸、醇、芳香族化合物、脂、内脂、杂环化合物等组成，其中对人体健康影响较大的是 CO、SO₂、CO₂、NO_x、可吸入尘及环芳香烃类强致癌物如：苯并（a）芘等，这些污染物对人体有很大的危害[46]。厨房油烟中包含多种不同粒径范围的粒，各类颗粒物的粒径分布见表 4-1 及图 4-1[47]所示。

表 4-1 油烟中各粒径颗粒物的数量分布

组别	粒径 (mm)							
	≥0.50	>1.0	>2.0	>3.5	>5.0	>7.5	>10.0	>15.0
油烟组	289	277	238	190	135	110	70	29

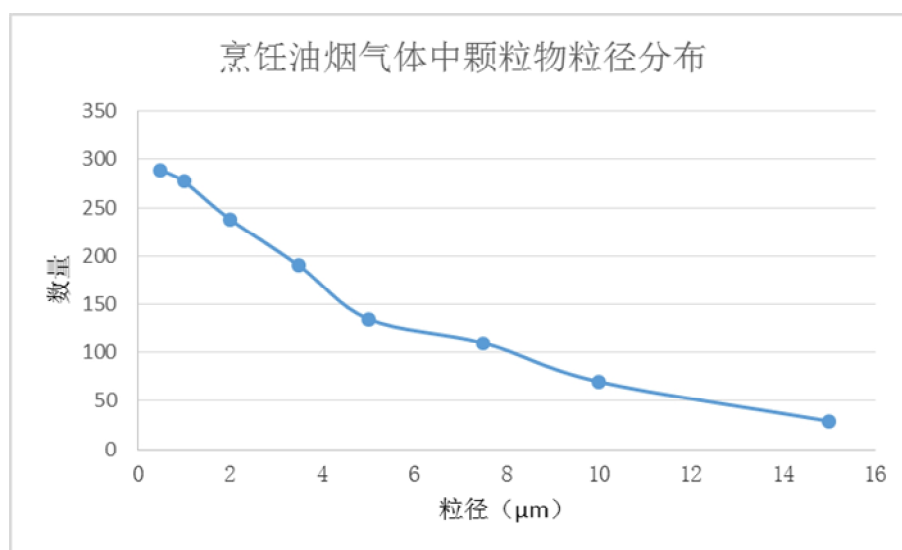


图 4-1 油烟中各粒径颗粒物分布趋势

从上图可以清楚的看出，可吸入颗粒物（粒径小于 10）的数量较多，占总量的 98%。从图 4-1 还可看出随着油烟颗粒的减小，颗粒数目呈现增多的趋势，PM_{2.5} 的数量在整个 PM₁₀ 中占有相当大的比重，达到了 69%。因此，对厨房油烟气中 PM_{2.5} 的研究具有重要意义。

目前，越来越多的国内外学者开始重视室内厨房烟气的研究与治理。1999 年王凯雄等指出油烟气中的最主要成分是脂肪酸、烧径和稀烟；其次是酸类化合物；再次是酮、酯、芳香化合物和杂环化合物等[48]。2000 年 Che-Ming Chiang 等通过数值模拟方法模拟住宅厨房内速度场、温度场和浓度场，提出自然通风技术解决污染问题。模拟结果显示污染物聚集在煤气焰的上方，吸油烟机能够有效地排除污染物。他们提出使用天窗代替吸油烟机，在节能减噪音的前提下能有效排除污染物[49]。2011 年葡萄牙 M.Pinto,J.Viegas 和 V.P.de Freitas 对葡萄牙建筑居室内的通风进行了研究，认为近年葡萄牙窗户设计在透气性方面有所改善，虽然厨卫均安装了排气扇，但仍然不能满足室内的最小换气次数，他用使用实验的方法得到了大量相关数据，为今后提高厨房室内空气品质，降低厨房 PM_{2.5} 质量浓度分布的相关模拟研究奠定了数据基础[50]。2011 年沈阳建筑大学谷超对模拟厨房内有排油烟机作用下的液化气燃烧产生的废气(CO₂ 和 CO)浓度和厨房内的温度进行实测，利用实验数据对高斯模型进行修正，得到满足实验条件的污染浓度扩散模型,在此基础上建立污染物的火用和火用强度模型。在 VC++平台下开发污染物（包括 PM_{2.5}）动态扩散模拟软件[51]。2013 年 M. Amouei Torkmahalleh 等研究了不同烹饪调料对加热的食用油（200℃）排放 PM_{2.5} 的特性影响。研究表明，将 100 毫克的调料放入菜籽油和大豆油中，黑胡椒粉、食用盐、海盐分别能够降低菜籽油中 86%、88%、91%的 PM_{2.5} 排放量，分别能够降低大豆油中 86%、47%、77%的 PM_{2.5} 排放量，而大蒜粉末和生姜粉末不能减少 PM_{2.5} 的排放量，因此黑胡椒粉、食用盐、海盐能够有效降低食用油烹饪过程中的 PM_{2.5} 的排放量[52]。2000 年 Shun Cheng Lee 等对香港四所典型的商业餐饮店进行监测，研究结果表明韩国烤肉店的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度分别高达 1442 和 1167μm/m³，韩国烤肉店和火锅店中 PM_{2.5} 占到 PM₁₀ 的浓度比例为 80-93%[53]。2013 年 Jun Gao 等对典型中式烹饪过程中油烟气产生的颗粒体积与质量分布进行了研究，研究表明颗粒物的排放特性与使用的油的种类无关，与加热温度有很大关系，在 PM_{0.1-10} 的分布中，直径为 1.0-4.0μm 的颗粒几乎占到了 100%，中值直径为 2.6μm [54]。本课题通过对住宅及商业厨房分别进行测试，主要探讨炊事过程 PM_{2.5} 质量浓度变化规律，通过对规律的总结，定量核算厨房产生 PM_{2.5} 总量以及对大气环境的贡献率。

4.2 测试手段

本课题中，测试 PM_{2.5} 仪器为 LD-5 粉尘烟尘专用检测仪。LD-5 激光粉尘仪是用于烟尘检测的专用仪器，具有新世纪国际先进水平的新型内置滤膜在线采样器的微电脑激光粉尘仪，在连续监测粉尘浓度的同时，可收集到颗粒物，以便对其成份进行分析，并求出质量浓度转换系数 K 值。可直读粉尘质量浓度（mg/m³），具有 PM₁₀、PM₅、PM_{2.5}、PM_{1.0} 及 TSP 切割器供选择。仪器采用了强力抽气泵，使其更适合需配备较长采样管的中央空调排气口 PM₁₀ 可吸入颗粒物浓度的检测。和对可吸入尘 PM_{2.5} 粒径粉尘进行监测。

该仪器符合工业企业卫生标准（GBZ1-2002）、工作场所有害因素接触限值（GBZ2-2002）标准、卫生部 WS/T206-2001《公共场所空气中可吸入颗粒物（PM₁₀）测定法-光散射法》标准、劳动部 LD98-1996《空气中粉尘浓度的光散射式测定法》标准以及铁道部 TB/T2323-92《铁路作业场所空气中粉尘测定相对质量浓度与质量浓度的转换方法》等行业标准以及卫生部卫法监发 [2003] 225 号文件发布的《公共场所集中空调通风系统卫生规范》。

仪器的主要技术指标如下所以：

主要技术指标

- 1、配置 40mm 滤膜在线采样器；
- 2、具有可更换粒子切割器 PM₁₀、PM₅、PM_{2.5}、PM_{1.0} 及 TSP 供选择；
- 3、直读粉尘质量浓度（mg/m³），1 分钟出结果
- 4、大屏幕液晶显示器，汉字菜单提示；
- 5、检测灵敏度：LD—5（L） 0.01mg/m³； LD—5（H） 0.001mg/m³。
- 6、重复性误差：± 2 %
- 7、测量精度：±10%
- 8、测量范围：LD—5（L） 0.01~100 mg/m³； LD—5（H） 0.001~10 mg/m³。
- 9、测定时间：标准时间为 1 分钟，设有 0.1 分及手动档（可任意设定采样时间）。
- 10、具有公共场所监测模式、大气环境监测模式以及劳动卫生模式。可计算出时间加权平均值（TWA）和短时间接触允许浓度（STEL）等。
- 11、存贮：可循环存储 999 组数据。
- 12、定时采样：可设定测量时间（1~9999）秒，关机时间（0~9999）秒，预热时间（0~10）秒及采样次数（1~9999）次。
- 13、粉尘浓度超标报警阈值设定：浓度最大阈值：65mg/m³；测定时间：（1~9999）秒
- 14、输出接口：

(1) PC 机通讯接口: RS232; 可选 RS485 ; 可选无线数传电台; 可选 GPRS 通讯

(2) 微型打印机输出接口;

(3) 模拟量输出接口: 0—1V; 可选 4-20mA

(4) 数字量输出接口: 电平信号。

15、 电源: Ni-MH 充电电池组 (1.2V x 4), 可连续使用 8 小时; 附 220VAC/12VDC 电源适配器。

16、另配具有湿度修正功能, 数据更加精确

17、 重量: 2.4kg。 195mm*85mm*132mm

4.3 测试对象

本课题对首次按对典型的三口之家和四口之家典型的住宅建筑进行现场测试, 测试的工况包括油炸、爆炒、蒸煮、清炒及红烧等五种烹饪方式。每种烹饪方式测试 5 户, 主要测抽油烟机排烟处 $PM_{2.5}$ 质量浓度, 测试时间为 20 分钟, 每 0.5 分钟记录一次, 同时记录抽油烟机的风量值, 最终计算出 $PM_{2.5}$ 总的产生量。同时课题组对 3 所商业进行测试, 商业厨房测试过程中, 因不能完全以烹饪方式分开 (同一灶台可以进行不同烹饪), 所以只能连续监测烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度, 同时记录烟气排放量, 最终计算出 $PM_{2.5}$ 总的产生量, 每个商用厨房, 测试间两个小时, 时间从 11:30-13:30, 每 2 分钟记录一次数据。

4.4 测试结果

对于三口之家, 五种不同烹饪方式下, 平均五户烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度不同时刻的浓度值如下表所示:

表 4-2 针对三口之家, 不同烹饪方式下, 不同时刻 $PM_{2.5}$ 质量浓度 (ug/m^3)

时间 (S)	油炸(ug/m^3)	爆炒(ug/m^3)	蒸煮(ug/m^3)	清炒(ug/m^3)	红烧(ug/m^3)
0	62	58	65	125	79
0.5	73	63	72	132	126
1	91	78	76	126	136
1.5	123	132	102	148	145
2	138	142	132	256	182
2.5	212	126	142	189	195

3	263	135	163	196	204
3.5	351	147	175	223	265
4	422	265	189	245	168
4.5	478	385	201	356	358
5	561	498	231	289	421
5.5	536	652	321	301	552
6	589	701	365	389	785
6.5	612	752	378	452	741
7	645	822	396	489	798
7.5	674	862	401	589	801
8	701	901	421	511	845
8.5	712	912	435	523	785
9	732	1004	456	569	889
9.5	745	1121	456	689	901
10	758	985	461	785	921
10.5	821	871	475	794	955
11	701	950	542	684	936
11.5	652	851	623	681	945
12	690	652	436	694	923
1 _{2.5}	625	724	521	645	861
13	640	456	436	598	789
13.5	589	566	396	587	756
14	560	396	384	567	721
14.5	489	582	345	547	701
15	510	415	365	458	625
15.5	451	521	378	425	456
16	356	348	321	402	485
16.5	351	369	258	358	369
17	298	312	289	536	389
17.5	265	320	241	248	342
18	212	256	231	263	289
18.5	156	142	136	198	321
19	128	163	156	158	214

19.5	75	95	89	120	186
20	65	78	85	110	123
平均值	441.76	483.12	301.10	406.22	528.85

依据表 4-2 中的数据，将其绘制成图，更能够形象表达出不同的烹饪过程 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势，其中油炸过程产生 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化的规律如图 4-2 所示，其中爆炒过程产生 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化的规律如图 4-3 所示，其中蒸煮过程产生 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化的规律如图 4-4 所示，其中清炒过程产生 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化的规律如图 4-5 所示，红烧过程产生 $PM_{2.5}$ 质量浓度如图 4-6 所示。

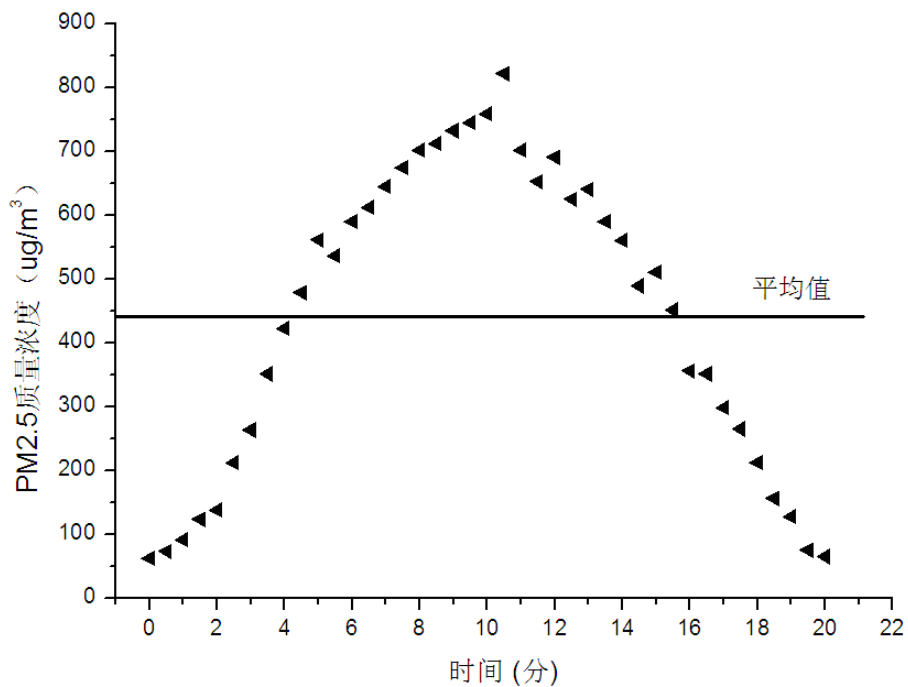


图 4-2 油炸过程 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化的规律（三口之家）

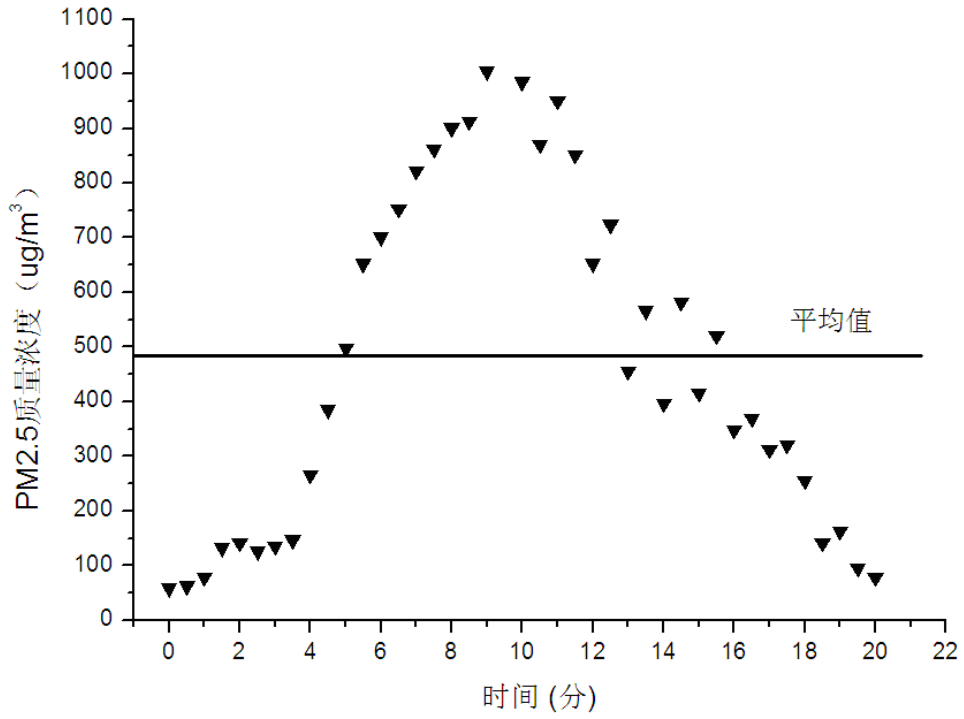


图 4-3 爆炒过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（三口之家）

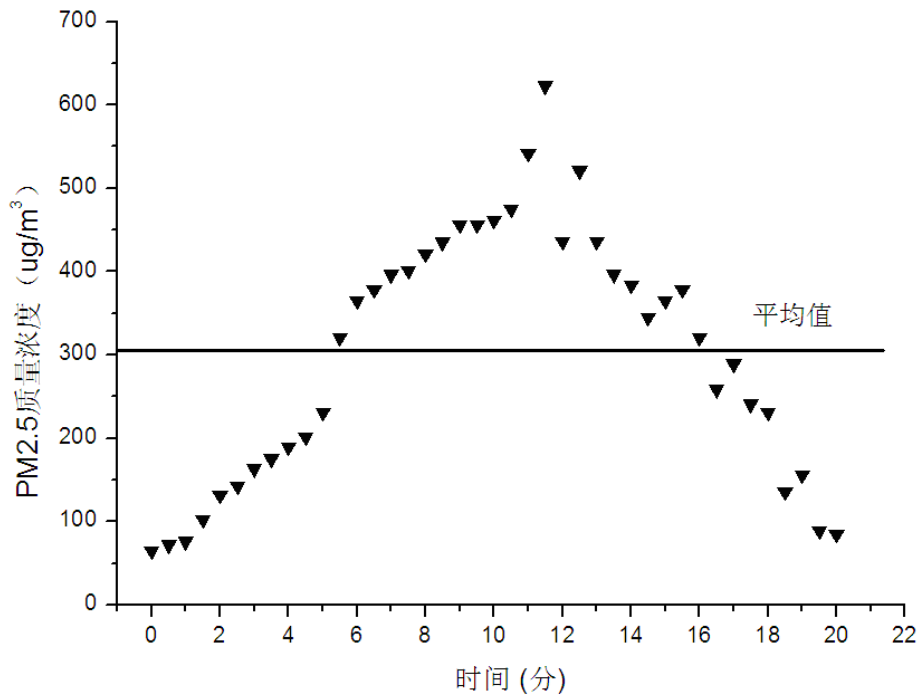


图 4-4 蒸煮过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（三口之家）

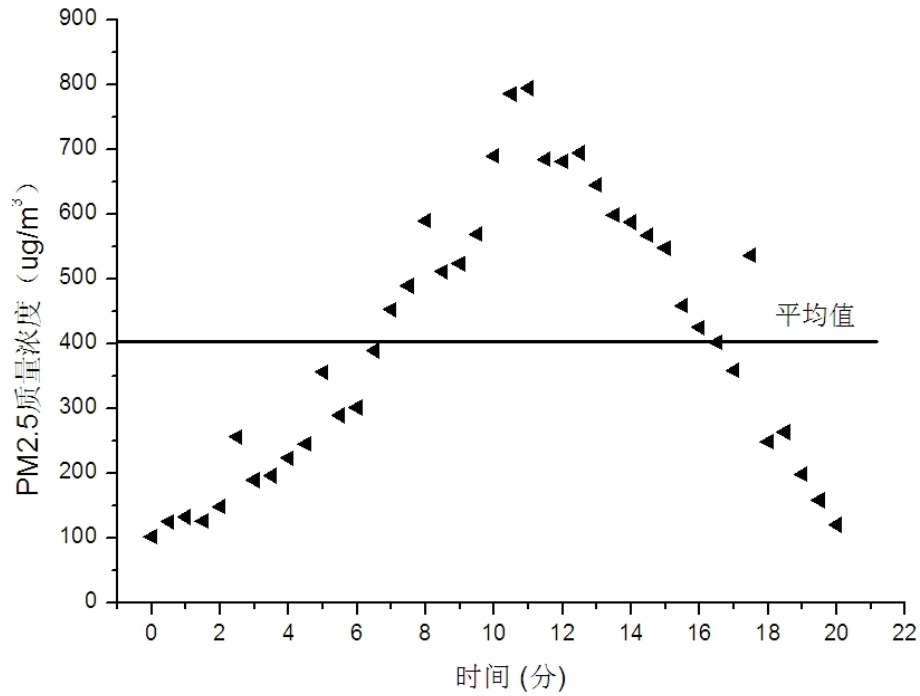


图 4-5 清炒过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（三口之家）

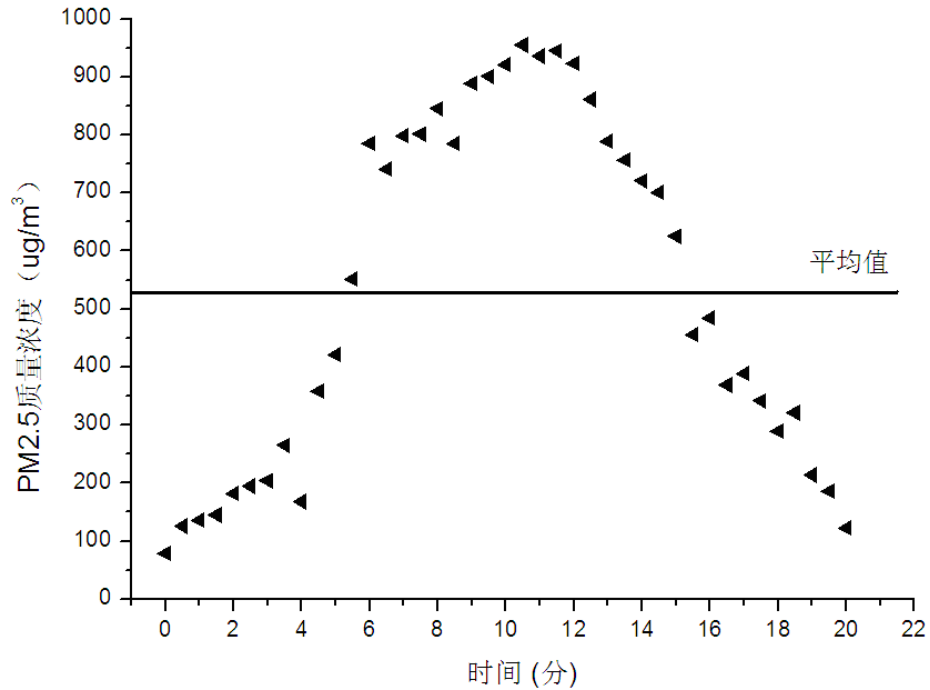


图 4-6 红烧过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（三口之家）

从图 4-2、4-3、4-4、4-5 及 4-5 可以看出，随着烹饪时间的变化，不同烹饪过程 PM_{2.5} 的浓度均均出现了先增大后减小的变化趋势。不同烹饪过程产生的烟

气的 PM_{2.5} 质量浓度不同，其中爆炒、油炸及红烧过程，产生 PM_{2.5} 质量浓度高于蒸煮和清炒的过程。红烧过程中，PM_{2.5} 最大峰值浓度出现在第九分钟左右，最大峰值浓度为 988ug/m³，其平均浓度为 528.85ug/m³；而对于清炒过程中，最大峰值出现在第 11 分钟左右，最大峰值为 842ug/m³，其平均浓度为 406.22ug/m³；对于蒸煮过程，最大峰值出现在第 12 分钟左右，最大峰值为 668ug/m³，其平均浓度为 301.10 ug/m³；对于爆炒过程，最大峰值出现在第 11 分钟左右，最大峰值超过 1000ug/m³，其平均浓度为 483.12 ug/m³；对于油炸过程，最大峰值出现在第 10 分钟左右，最大峰值为 858 ug/m³ 左右，其平均浓度为 441.76 ug/m³。

本课题同时也对四口之家，五种不同烹饪方式下，平均五户烟气中 PM_{2.5} 质量浓度不同时刻的浓度统计值如下表所示：

表 4-3 针对四口之家，不同烹饪方式下，不同时刻 PM_{2.5} 质量浓度 (ug/m³)

时间	油炸 (ug/m ³)	爆炒 (ug/m ³)	蒸煮 (ug/m ³)	清炒 (ug/m ³)	红烧 (ug/m ³)
0	65	72	87	101	104
0.5	103	89	96	165	168
1	118	121	103	154	181
1.5	178	184	145	198	186
2	168	192	189	341	256
2.5	271	168	189	251	242
3	362	186	232	261	287
3.5	489	201	241	301	352
4	541	354	145	345	234
4.5	789	532	268	485	489
5	635	664	315	389	556
5.5	654	901	389	410	734
6	854	945	489	506	1055
6.5	890	1142	652	609	986
7	986	1123	589	645	1211
7.5	1321	1258	532	779	1238
8	963	1296	547	685	1123
8.5	101	1214	546	701	1032
9	879	1334	610	745	1265
9.5	895	1589	652	926	1201

10	1320	1456	634	1055	1263
10.5	124	1667	621	1099	1278
11	869	1324	712	910	1245
11.5	795	1135	898	930	1025
12	1032	897	568	952	1254
1 _{2.5}	865	1020	698	878	1244
13	874	671	580	801	1043
13.5	986	785	537	798	1224
14	734	542	512	754	968
14.5	651	778	485	735	935
15	678	559	541	611	832
15.5	601	705	521	589	601
16	473	485	436	589	652
16.5	466	501	342	471	498
17	401	589	401	725	521
17.5	351	421	321	366	425
18	281	356	301	345	387
18.5	241	204	241	278	421
19	172	201	210	241	268
19.5	95	126	121	165	248
20	65	86	92	121	125
平均值	569.17	684.71	409.46	546.59	716.02

从表 4-3 可以看出，对于五种烹饪过程，四口之家产生烟气中的 $PM_{2.5}$ 的质量平均值均高于三口之间，但两类家庭 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化趋势相似，即随着时间变化，烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度出现先增大后减小的变化规律。

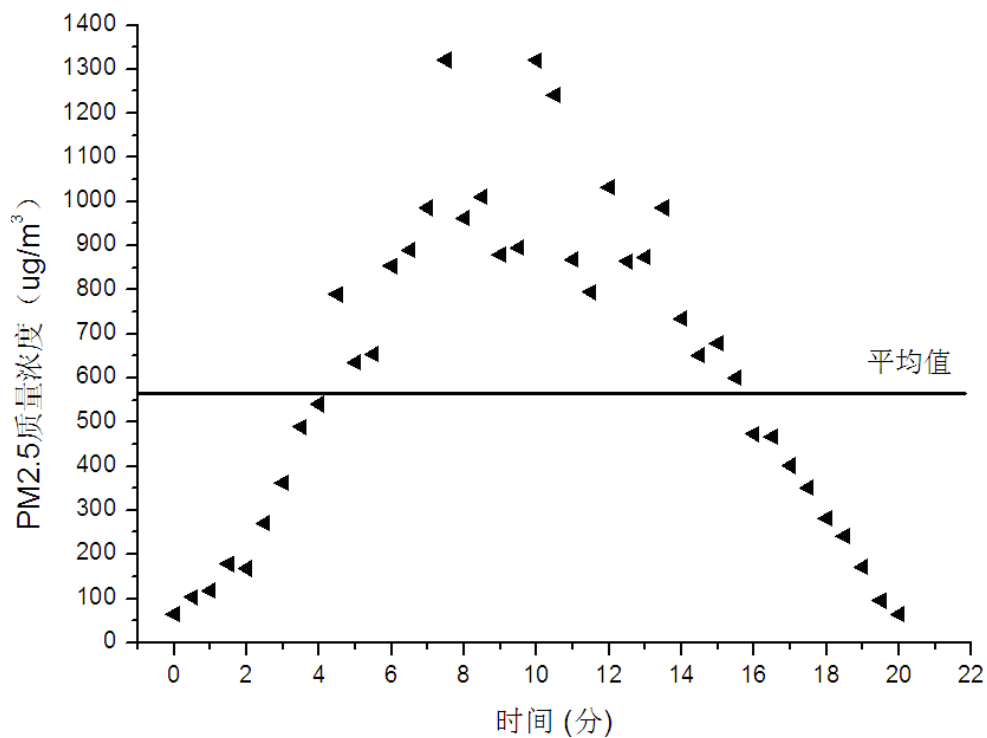


图 4-7 油炸过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（四口之家）

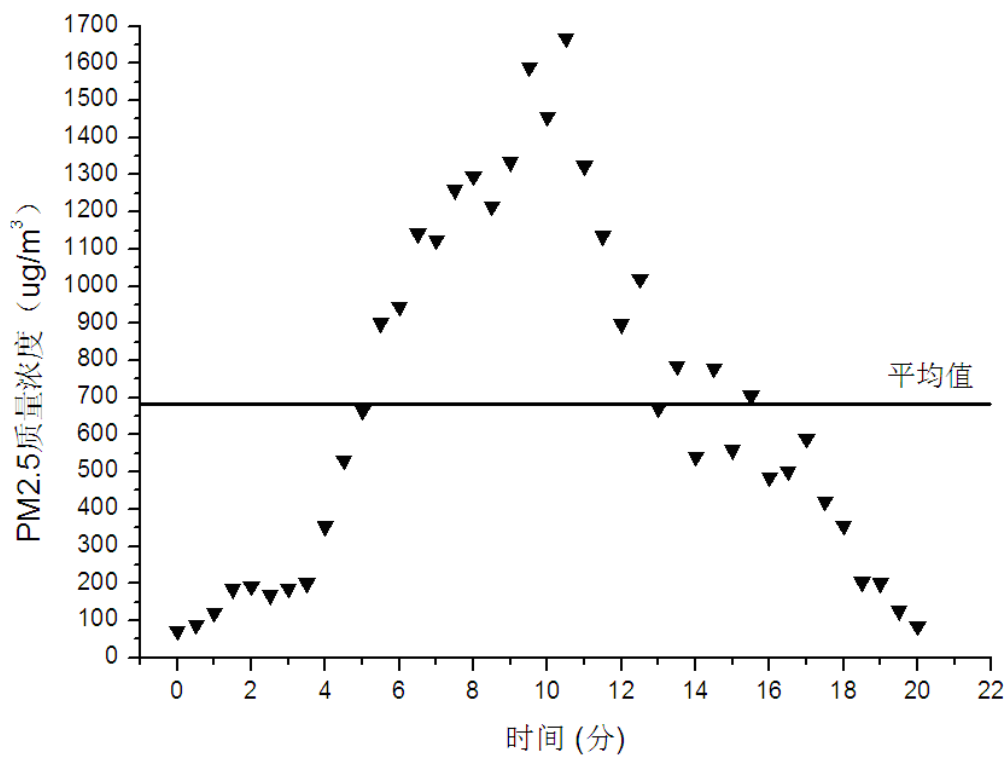


图 4-8 爆炒过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（四口之家）

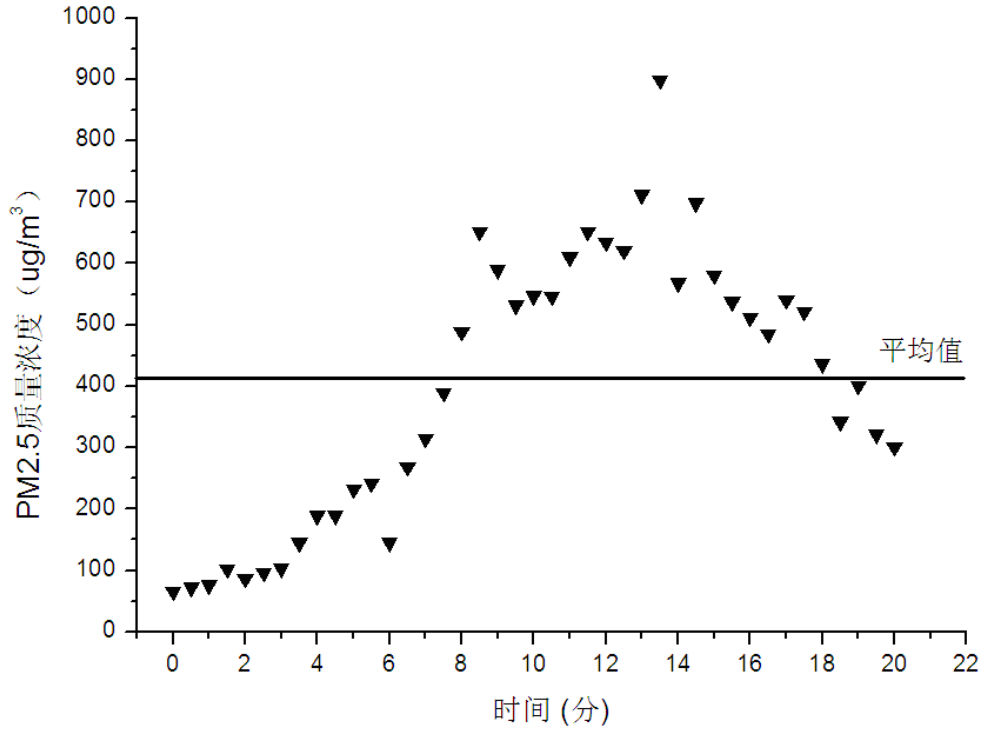


图 4-9 蒸煮过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（四口之家）

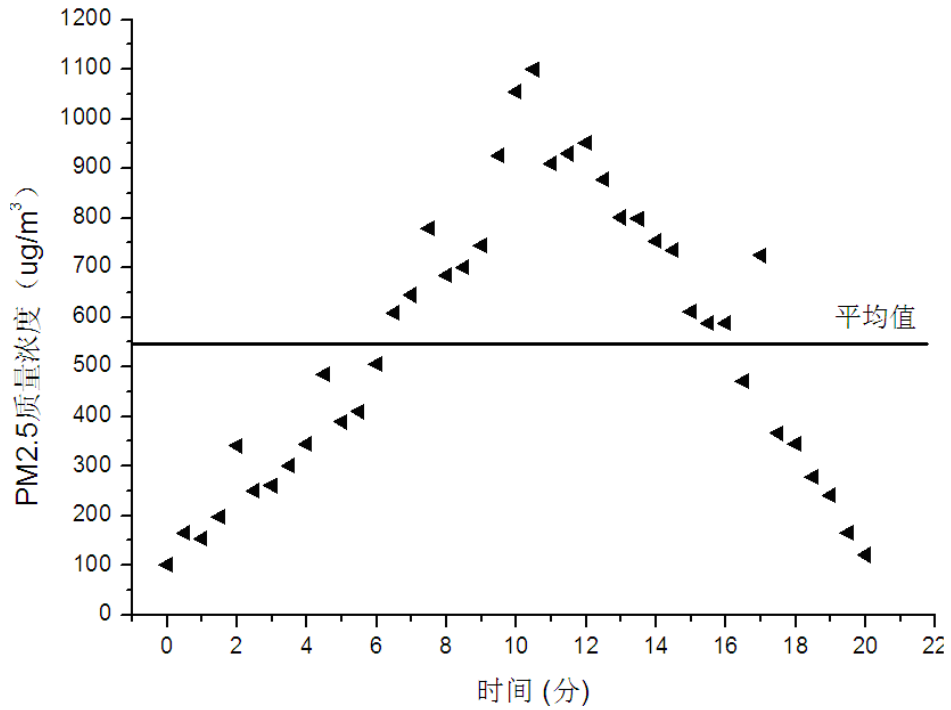


图 4-10 清炒过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（四口之家）

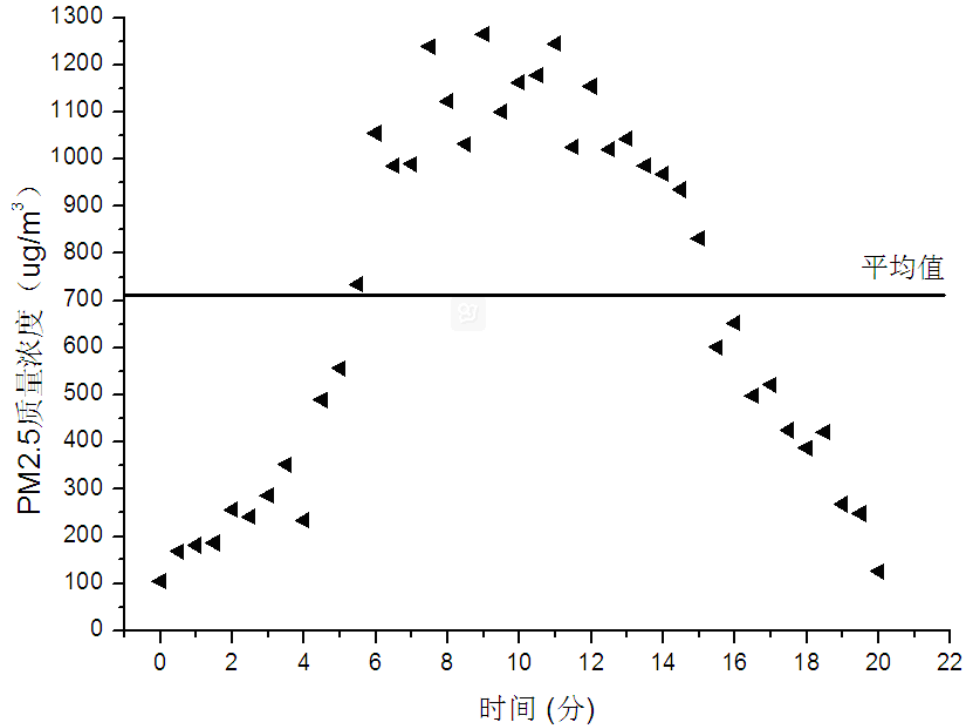


图 4-11 红烧过程 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化的规律（四口之家）

从图 4-7、4-8、4-9、4-10 及 4-11 可以看出，随着烹饪时间的变化，不同烹饪过程 PM_{2.5} 的浓度均出现了先增大后减小的变化趋势。不同烹饪过程产生的烟气的 PM_{2.5} 质量浓度不同，其中爆炒、油炸及红烧过程，产生 PM_{2.5} 质量浓度高于蒸煮和清炒的过程。红烧过程中，PM_{2.5} 最大峰值浓度出现在第 10 分钟左右，最大峰值浓度为 1252ug/m³，其平均浓度为 716.02ug/m³；而对于清炒过程中，最大峰值出现在第 11 分钟左右，最大峰值为 1150ug/m³，其平均浓度为 546.59ug/m³；对于蒸煮过程，最大峰值出现在第 14 分钟左右，最大峰值为 950ug/m³，其平均浓度为 409.46 ug/m³；对于爆炒过程，最大峰值出现在第 10 分钟左右，最大峰值超过 1700ug/m³，其平均浓度为 684.71ug/m³；对于油炸过程，最大峰值出现在第 7 分钟左右，最大峰值为 1352 ug/m³ 左右，其平均浓度为 569.17 ug/m³。

表 4-4 两类家庭不同烹饪过程产生烟气中 PM_{2.5} 浓度平均值

炊事模式	人口数量户数	
	3	4
爆炒	441.76	569.17
油炸	483.12	684.71
蒸煮	301.10	409.46

清炒	406.22	546.59
红烧	528.85	716.02

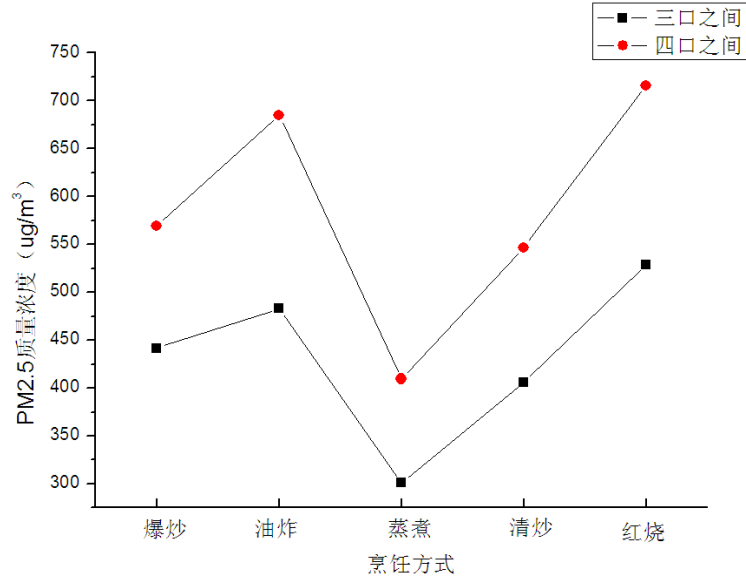


图 4-12 两类家庭不同烹饪方式下烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度平均值分布

从上图可以看出，随着人口的增加，不同烹饪过程中烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增加，对于不同的烹饪方式， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的平均值不同，其中红烧过程产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度最高，其次为油炸，爆炒次之，清炒过程中产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 少于爆炒，而蒸煮过程 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为最少。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与人口数量有密切相关性。

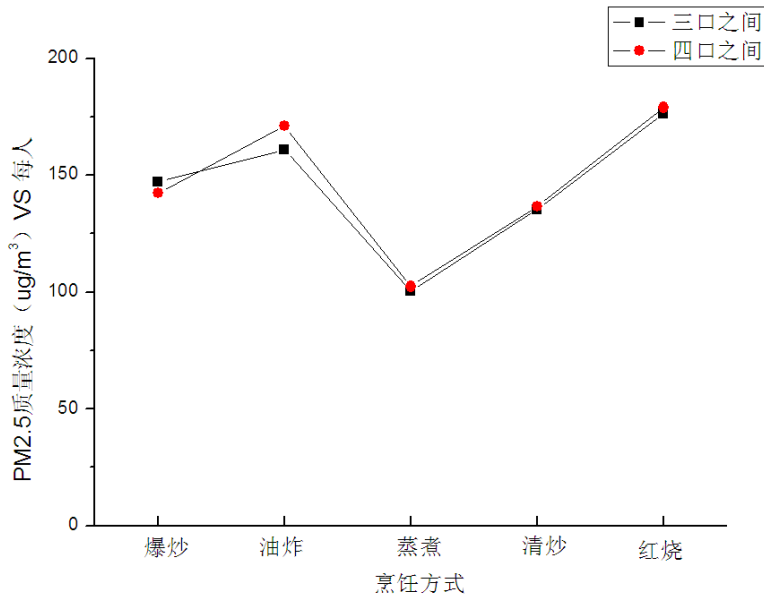


图 4-12 两类家庭不同烹饪方式下相对于每个人 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值分布

从上图可以看出两类家庭中，不同烹饪方式下，烟气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度不同。对于同一种烹饪方式，两类家庭中相对于每个人的烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度几乎相同，通过测试三口之家和四口之家两类家庭，可以看出 $PM_{2.5}$ 产生的总量与人口密切相关。通过计算爆炒、油炸、蒸煮、清炒及红烧不同烹饪过程 $PM_{2.5}$ 的质量浓度平均浓度，统计烟气排放量，最后可以核算出不同家庭 $PM_{2.5}$ 产生总量。本研究中烟气量为 20 立方米/min，时间为 20 分钟，对于三口之家不同烹饪方式下，每人每天产生的 $PM_{2.5}$ 质量为 58519ug，对于四口之家，每人每天产生的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 57628ug。对比发现，二者相差不大，对于住宅建筑中，以人口数量为基数，估算 $PM_{2.5}$ 产生的总量是可行的。

本课题同时对商业厨房测试过程，因为商业厨房同一炉灶进行不同的烹饪过程，所以不能完全以烹饪方式将炊事过程分开，所以只能连续监测烟气浓度及流量，统计厨房流量，从而计算 $PM_{2.5}$ 质量产生量。本次研究测试 A、B、C 三个厨房，每个商用厨房测试两个小时，测试时间段为：11:30-13:30，每两分钟记录一次烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度。同时统计三个不同厨房的排放量，其中 A 厨房的排风量 11000 m^3/h ，B 厨房的排风量 9000 m^3/h ，C 厨房的排放量为 8000 m^3/h 。测试期间，统计饭店人流量，其中 A 厨房的人流量为 286 人，B 厨房的人流量为 102 人，C 厨房的人流量为 146 人。其中三所商业厨房中，排烟烟气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化，如表 4-4 所示。

表 4-5 三所商业厨房排烟烟气中不同时刻 $PM_{2.5}$ 质量浓度

时间	厨房 A 烟气 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu g/m^3$)	厨房 B 烟气 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu g/m^3$)	厨房 C 烟气 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu g/m^3$)
0	180	201	103
2	231	345	154
4	256	292	232
6	321	386	489
8	385	231	375
10	368	212	324
12	641	268	268
14	781	356	241
16	874	115	352
18	562	123	369
20	456	158	397
22	541	98	402

24	689	156	425
26	789	189	465
28	891	192	501
30	921	197	526
32	945	185	578
34	1025	202	596
36	985	289	698
38	456	365	647
40	978	455	758
42	876	368	689
44	756	389	675
46	654	365	632
48	556	356	485
50	986	451	425
52	456	489	355
54	897	478	298
56	122	433	578
58	564	532	487
60	656	541	469
62	546	562	789
64	98	587	765
66	789	521	865
68	864	421	912
70	9897	456	935
72	921	432	948
74	936	348	1054
76	945	369	978
78	987	348	654
80	1025	345	545
82	932	321	882
84	965	312	891
86	896	308	932
88	875	379	715

90	654	421	341
92	685	432	856
94	624	474	789
96	789	485	963
98	653	498	562
100	632	501	852
102	585	368	986
104	546	389	752
106	532	378	524
108	485	545	856
110	578	513	546
112	354	365	638
114	262	289	421
116	223	248	286
118	212	198	189
120	135	125	141
平均浓度	793.82	350.08	582.95

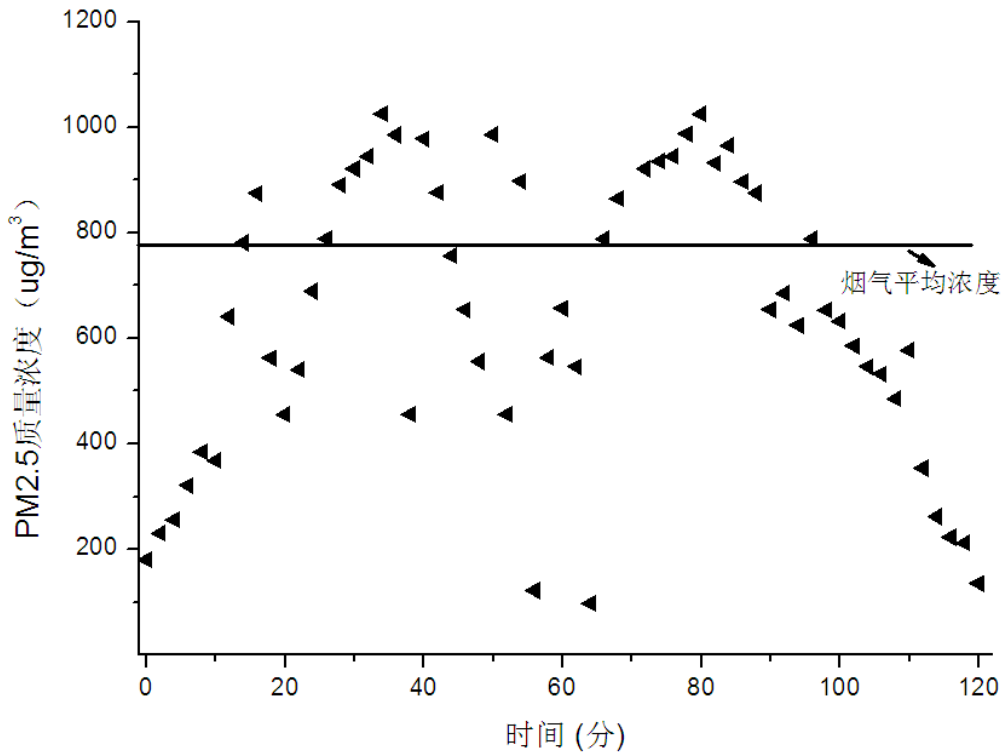


图 4-13 A 商业厨房排烟烟气中 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化趋势

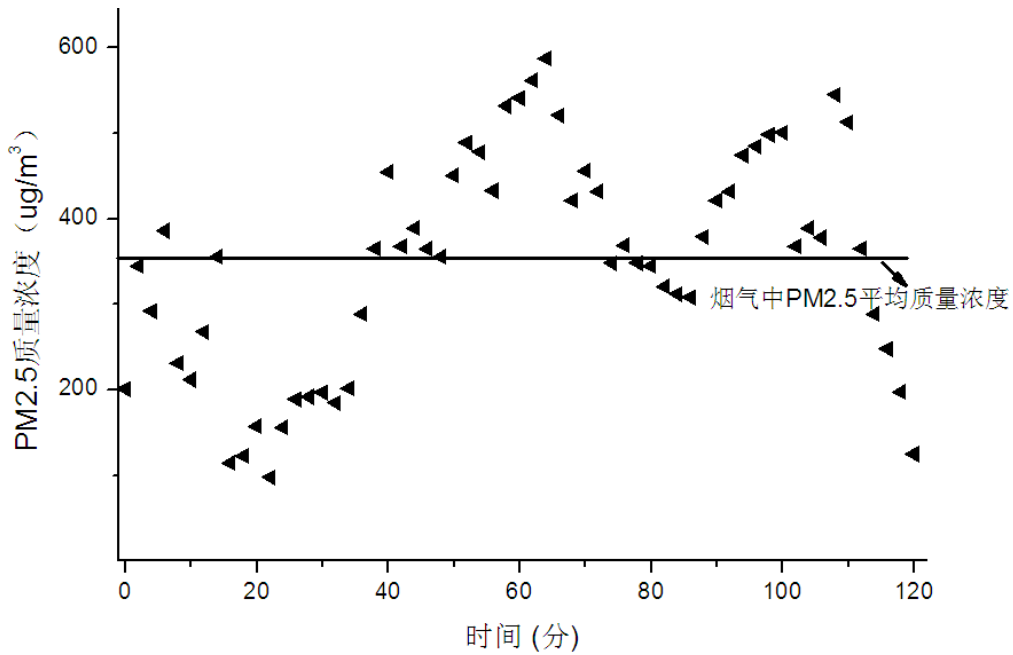


图 4-14 B 商业厨房排烟烟气中 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化趋势

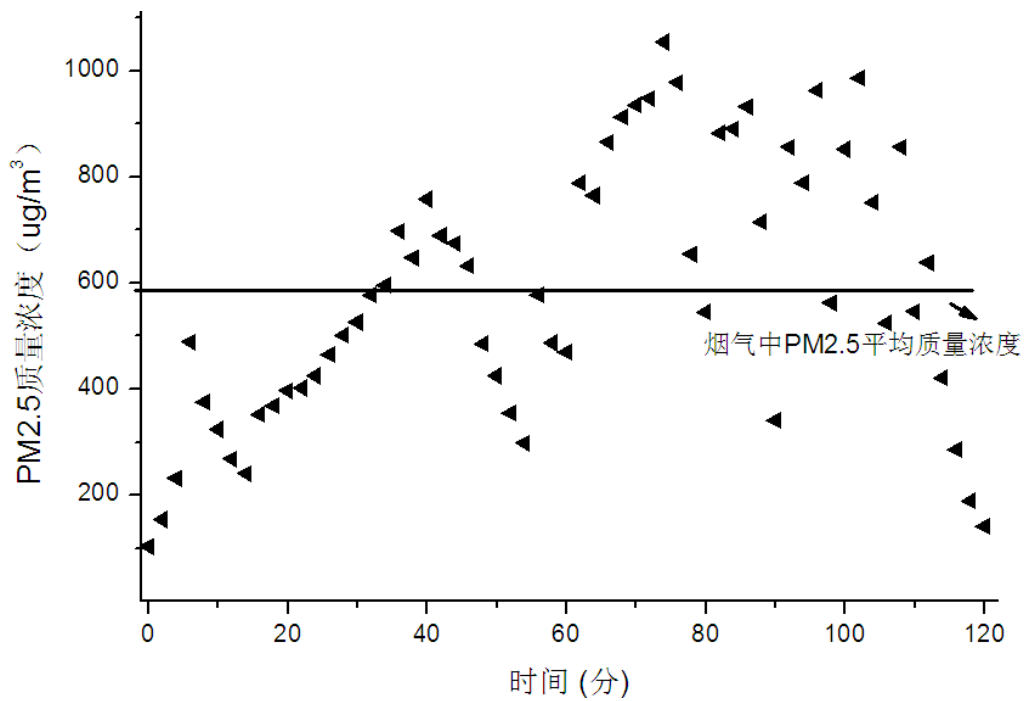


图 4-14 C 商业厨房排烟烟气中 PM_{2.5} 质量浓度随时间变化趋势

从表 4-5 及图 4-12，图 4-13 及图 4-14 可以看出，不同商业厨房烟气 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势相差较大，出现峰值时间和大小也有较大的差异，这可能与烹饪过程有关。A、B、C 三所厨房的排烟烟气中 PM_{2.5} 平均质量浓度分别为 793.82ug/m³、350.08 ug/m³ 及 582.95 ug/m³。

本课通过公式（4-1）计算商业炊事过程中，每个人产生的 PM_{2.5} 总量。

$$M = \rho (\text{烟气中 PM}_{2.5} \text{ 平均浓度}) \times V (\text{排放体积}) / \text{Number} (\text{人口数量}) \quad (4-1)$$

计算结果得出，A、B、C 三种厨房的平均每个人每天每次产生的 PM_{2.5} 质量分别为 61063ug、61779.17ug、63885ug，三所商业厨房平均每人每天每次产生的 PM_{2.5} 平均值为 62242，与住宅炊事平均每人每次产生 PM_{2.5} 总量相比，相差不大。

对于住宅建筑，对于三口之家，平均每人每天每次产生的 PM_{2.5} 总量为 58519ug，对于四口之家，每人每天每次产生的 PM_{2.5} 质量浓度为 57628ug，通过计算两类不同住宅建筑每人每天每次平均产生 PM_{2.5} 质量为 58074ug，其值与商业厨房每人每天每次产生 PM_{2.5} 质量浓度差值在 6.7% 左右。两者之间较小的差异，证明可以用人口定量估算北京地区炊事排放 PM_{2.5} 的总量。北京地区人口数量约为 2665.7 万左右，如下表 4-6 所示，通过计算可得北京一年由于炊事可排放 PM_{2.5} 总量约为 1751t。不同行政区由于炊事产生的 PM_{2.5} 量如下：东城区—74.82t，西城区—103.13t，朝阳区—332.37 t、丰台区—192.13 t、石景山区—54.06、海淀区—298.02 t、房山区—74.88 t、通州区—106.35 t、顺义区—75.93 t、昌平区—164.74 t、大兴区—131.96 t、门头沟区—22.14 t、怀柔区—31.27 t、平谷区—30.54 t、密云县—35.27 t、延庆县—23.38 t。

表 4-5 北京不同行政区人口数量分布（数据来源北京市统计局）

区 县	2010 年		
	常住	流动	合计
全 市	1961.2	704.5	2665.7
东 城 区	91.9	22.0	113.9
西 城 区	124.3	32.7	157.0
朝 阳 区	354.5	151.5	506.0
丰 台 区	211.2	81.3	292.5
石 景 山 区	61.6	20.7	82.3
海 淀 区	328.1	125.6	453.7
房 山 区	94.5	19.5	114.0
通 州 区	118.4	43.5	161.9
顺 义 区	87.7	27.9	115.6
昌 平 区	166.1	84.7	250.8
大 兴 区	136.5	64.4	200.9
门 头 沟 区	29.0	4.7	33.7
怀 柔 区	37.3	10.3	47.6
平 谷 区	41.6	4.9	46.5
密 云 县	46.8	6.9	53.7
延 庆 县	31.7	3.9	35.6

本次测试得出不同类型厨房烟气中 $PM_{2.5}$ 随时间变化的规律，得出炊事产生的 $PM_{2.5}$ 总量与人口数量密切相关，其分布与人口密度呈良好的正相关。同时获得了北京地区每人每天每次烹饪平均产生的 $PM_{2.5}$ 质量约为 60000ug，从而定量核算了北京地区由于炊事产生的 $PM_{2.5}$ 的总量为 1751t。根据研究结果，提出以下三方面措施可以减少炊事对 $PM_{2.5}$ 的贡献率。

(1) 调整各人烹饪习惯，尽量多采用蒸、煮、炖的方式，减少爆炒、红烧以及油炸等烹饪过程。

(2) 采用内排式抽油烟机，增强对油烟的回收及净化效果，尽量减少烟气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度。

(3) 改善烹饪用具，尽量使用产生油烟较少的炊具，例如无烟锅等，同时降低烹饪温度，尽量减少油烟的产生量。

第五章 建筑施工扬尘对北京 PM_{2.5} 排放特性影响

5.1 前言

建筑施工扬尘是因建筑工人为活动而引起的,其扬尘颗粒在施工人为活动的影响下会随着空气流动而移动,最后变成微细颗粒物(PM_{2.5}),易被人吸食,一旦进入肺中,就会引起一系列疾病,甚至危害人们的生命[55]。具体而言,建筑施工过程中,因施工人员活动或机械的运转而产生大量扬尘悬浮在控制,其不仅会使粉尘浓度增加,同时也会降低大气质量[56]。因建筑扬尘中含有大量的碳、氢、氧、硫、氯、氟等重金属且反应后容易产生毒,不仅会影响周围植物生长,同时也会影响人们的身体健康[57]。同时建筑扬尘中含有的重金属元素及粉尘颗粒会随着空气运动,一旦其中微细颗粒进入人体呼吸道系统、将会沉积在人体肺泡等部位,将会引发一系列呼吸系统疾病[58]。同时建筑扬尘中含有大量细菌和病毒,建筑扬尘便成为细菌和病毒加快传播载体,严重影响人们身体健康[59]。此外,建筑施工扬尘能降低城市能见度的降低[60]。在绝大多数情况下,影响城市能见度减低的因素是微细颗粒物的光散射作用,其中以粒径小于 2.5 μm 的颗粒物、硫酸盐、硝酸和碳黑等最为重要。大量观测事实证明:城市中的水平能见度比同时期郊区为小。同时,建筑施工扬尘能够破坏都市景观,有风条件下裸露施工地表将会产生大量的扬尘,从而使建筑物很快褪色,进一步影响都市景观和破坏人们的视觉效果和心理感受。因此,对建筑施工扬尘总量控制及污染健康损害进行相应研究,已经成为建筑施工、环境领域亟待解决的问题。

建筑扬尘作为一种重要的颗粒物开放源类,对于大气环境中 PM_{2.5} 质量具有重要贡献。建筑扬尘产生不仅与施工现场环境密切相关,同时与天气情况有一定的关联性,尤其与风速大小密切相关。探求建筑扬尘具体排放特征及污染特点,进而选择合适的监控指标,对于建筑施工扬尘污染防治及改善城市环境空气质量具有重要意义。早期很多学者对建筑扬尘做了较为详细的研究,例如北京工业大学赵秀勇[61]等人对北京市施工扬尘污染与控制做了详细的研究,研究过程建立了 ARPS、Models-3 耦合模型系统,得出了 1、4、8、10 月这 4 个月建筑扬尘对北京市空气污染的贡献率最高,贡献比例分别为 8.82%、8.25%、12.14%、13.74%。王铮[62]等人对北京无组织排放源颗粒物的粒度分布进行分析,结果表明:确定北京市无组织排放源排放颗粒物粒径的质量百分比,从而得出粒径在 0~100 微米之间颗粒物的粒度分布。城市扬尘可吸入颗粒物的质量百分比最大(16.46%),中位径 D₅₀ 最小(34 μm),细小颗粒物含量最多。田刚[63]等人对北京地区施工扬尘

的空间扩散规律进行了研究,探讨了建筑工地边界施工扬尘垂直扩散规律;通过监测建筑工地外同方向 0~210 m 范围内不同距离、相同高度(3m)处的降尘浓度变化,研究了建筑工地施工扬尘水平扩散规律,通过数据回归分别得出了施工扬尘垂直、水平的扩散模型。温玲丽[64]等人通过欧拉-拉格朗日随即轨道模型及蒙特卡洛数学模拟法对城市建筑施工扬尘空间运移模式进行了数值模拟,得出城市扬尘的空间运移的规律。2008 年 6 月,清华大学张智慧、吴凡等人[65]依照世界卫生组织提出的伤残调整生存年的评价思路,结合建筑工程施工特点,建立了评价施工扬尘污染对人体健康损害的定量模型,并把评价结果转化为相应货币化指标。2009 年,中国气象局北京城市气象研究所与南开大学环境科学与工程学院国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室等工作人员进行了建筑施工扬尘排放因子定量模型研究,现场采集大气中 PM₁₀、PM_{2.5}、气象、路面积尘及机动车数等数据,并确定施工扬尘排放的主要影响因素,利用 FDM 模型,计算施工扬尘排放因子,将计算得到的扬尘排放因子和各影响因素进行非线性拟合,建立施工扬尘 PM₁₀、PM_{2.5} 排放因子定量模型[66]。王帅杰、朱坦[67]等人对石家庄市地面起尘量估算方法,最终得出了 TSP 中扬尘浓度与地面起尘因子成准对数关系。黄嫣旻[68]对上海市地面扬尘的估算与分布特征研究,通过使用美国环保署提供的 AP-42 方法和台湾环保署的有关方法,结合收集的资料和现场调查采样,对上海市和吴淞工业区的铺设道路扬尘、堆场扬尘和建筑工地扬尘进行公式参数修正和扬尘量估算,并使用空间统计方法获得了上海市扬尘量的空间分布特征。K.F.Ho[69]等人探讨了香港地区建筑扬尘对大气环境中 PM_{2.5} 的贡献率。X. Quero[70]等人探讨了西班牙建筑扬尘对 PM_{2.5} 的贡献率,然而关于建筑扬尘产生 PM_{2.5} 总量计算的研究比较少。

本课题主要研究的目标主要探讨建筑施工扬尘对大气环境 PM_{2.5} 的贡献率,核算建筑施工扬尘产生 PM_{2.5} 的总量。在国内对地面扬尘的研究多集中在化学分析领域,对于建筑扬尘量的估算研究较少,对建筑施工活动产生的 PM_{2.5} 研究几乎没有,建筑扬尘估算有的采用划分下垫面类型的方法估算[71],有的采用 orlemomnl 总结的经验公式估算,或多或少都存在估算粗糙和未进行粒径分级的缺点。美国 EPA 于 1972 年发表了《空气污染物排放因子汇编》(AP-42)的文档,之后定期地添加新的内容对其进行更新,到 2001 年,AP-42 已经更新到了第五版。本论文讨论的公式就出自这个版本,也就是最新版本。AP-42 方法包括对区域范围的排放估算,具体设备的排放估算以及与周围空气质量相关的排放估算。AP-42 提供的扬尘量估算公式是基于大量排放测试的回归分析而得出的经验公式。由于对扬尘的实时监测困难,因此总量就难以计算。到目前为止,得到全球广泛公认的也就只有美国 EAP 提供的 AP-42 方法。

5.2 计算方法

建筑施工扬尘：指在城市市政基础设施建设、建筑物建造与拆迁、设备安装工程及装饰修缮工程等施工场所和施工过程中产生的扬尘。市政基础设施包括交通系统（包括道路、桥梁、隧道、地下通道、天桥等）、供电系统、燃气系统、给排水系统、通信系统、供热系统、防洪系统、污水处理厂、垃圾填埋场等及其附属设施[72]。

研究施工扬尘排放，主要依据美国AP-42 模型提出的经验公式，结合相关的排放参数进行估计。工地信息为北京市住建局提供的2010 年北京城区施工情况，主要分布如图所示，红点表示的是北京城区施工工地分布，施工工地数量为365个。

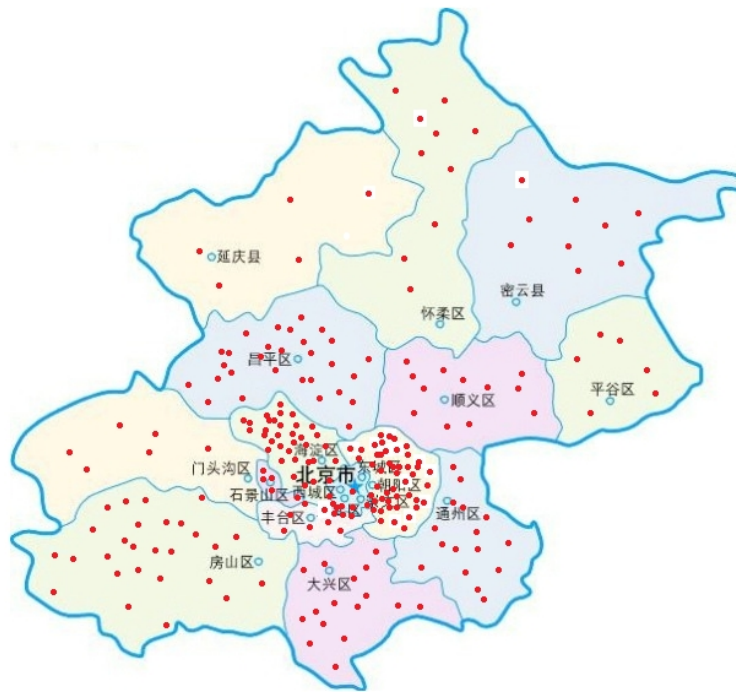


图 5-1 北京地区建筑工地分布情况

施工扬尘估算的主要公式： $EC=A \times T \times EFC$

上式中： EC 为在建工地引起的颗粒物排放量（吨/年）， A 为施工面积，（平方米）， T 为施工时间，（月）， EFC 为在建工地引起的颗粒物排放系数，排放量/（每单位施工面积×每月）。目前，对于建筑工地的推荐排放系： $EF_{PM10}=0.1061$ 千克/平方米·月； $EF_{TSP}=0.1910$ 千克/平方米·月[73]。根据王莹等人对北京地区的建筑扬尘粒径分布的结论， $PM_{2.5}$ 的质量分数比例为 13.29% [74]，故北京地区 $EF_{PM_{2.5}}=0.0141$ 千克/平方米·月。

本文依据上下风向法试验结果调整建筑工地推荐的排放系数,并依此估算北京城区施工扬尘中PM_{2.5}排放情况。查阅北京市信息统计网,北京地区2010年建筑在施工面积为15572.1万m²,其中不同行政区的2010年在施工建筑面积如下表5-1所示。

表5-1不同行政区在施工面积

行政区	在施工面积(万平方米)
东城区	452.9
西城区	438.5
朝阳区	3444.8
丰台区	986.7
石景山区	355.9
海淀区	1749.1
房山区	1042.5
通州区	1384.2
顺义区	1016.6
昌平区	1319.8
大兴区	1175.0
门头沟区	198.2
怀柔区	291.0
平谷区	282.5
密云县	409.7
延庆县	106.6
全市	15572.1

由上述所得相关参数计算得,施工工地年平均施工时间为182天,平均每个建筑工地施工面积为66098m²。本文中用到的AERMOD(AMS/EP REGULATORY MODEL)模型是由美国国家环境保护局与美国气象学会于1991年联合组建的法规模式改善委员会(AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee, AERMTC)开发的新一代扩散模型[75]。该模型是一种稳态烟羽模型,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范围内符合正态分布,采用高斯扩散公式建立起来的模型。在稳定边界层中,它将浓度在水平及垂直方向的分布看作高斯分布。在对流边界层中,浓度的水平分布也被看作高斯分布,但是在垂直方向浓度分布被描述为双高斯概率密度函数 [76]。

AERMOD 模型是一个完整的系统[77],包括AERMOD 气象前处理(AERMOD Meteorological Preprocessor, AERMET)、AERMIC扩散模型(AERMIC Dispersion Model, AERMOD)和AERMOD 地形前处理(AERMOD Terrain Preprocessor, AERMAP)三个模块。该模型运行的理论框架如图所示:

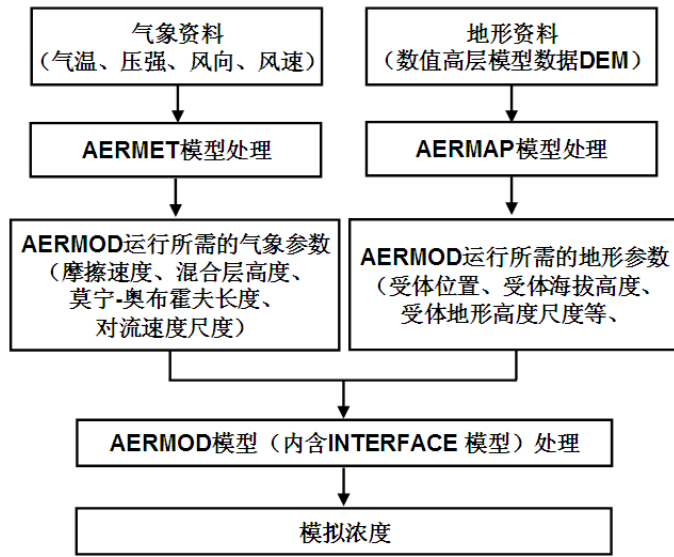


图5-2 AERMOD模型理论框架

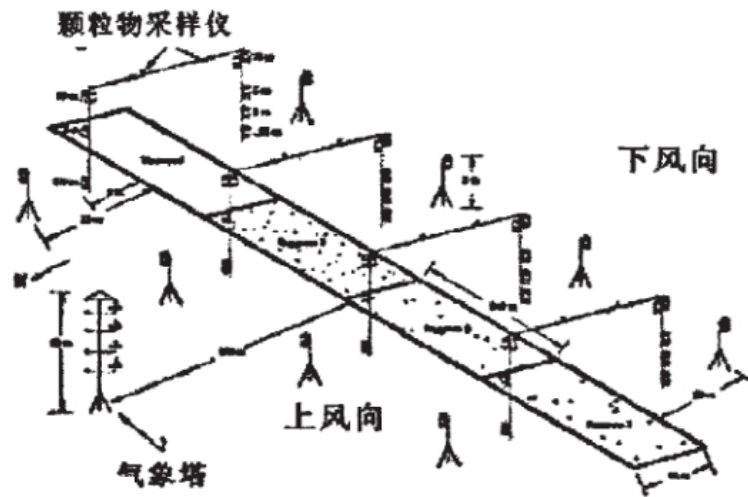


图5-3 上下风向检测示意图

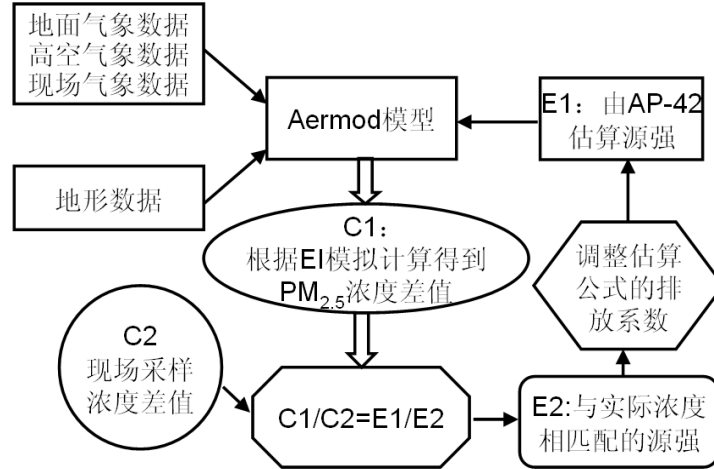


图5-4 PM_{2.5}排放量估算方法修正思路图

图5-4中E1可以根据AP-42方法中相关估算公式、利用野外采样分析得到的结果直接计算得到，C2即为现场监测浓度差值（下风向浓度减去上风向浓度），C1为高斯模型模拟得到的上下风向浓度差值（下风向浓度减去上风向浓度），E2是利用修正公式得到的、新的污染源排放强度。

5.3 测试对象



图5-5北京市海淀区蓝靛厂北路施工工地



图5-6 北京市朝阳区弘燕路美景东方小区施工工地



图5-7 北京市丰台区成寿寺中路138号院6号楼中海城施工工地

本文中根据上下风向法进行试验的区域包括北京市海淀区蓝靛厂北路施工工地、北京市朝阳区弘燕路美景东方小区施工工地、北京市丰台区成寿寺中路138号院6号楼中海城施工工地等三个区域（见图5-5,5-6和5-7所示），其中面积为

35282m²，68712m²和98621m²，平均释放高度3m，紫色五角星为测试仪器释放位置，采样期间为西北方向，采样时于上风向，安放两台，下风向安放两台仪器。采样仪器为KC - 120H 型智能中流量TSP 采样器。该仪器可进行四级采样，分别为TSP、PM₁₀、PM₅、PM_{2.5}，采样流量范围为80-120L/min。采样时自动累计采样时间和采样体积，并同时根据气压、温度等换算累计采样标况体积。采样浓度 $C=(M_2-M_1)/V$ ；M₂ 为采样后质量(mg)，M₁ 为采样前质量(mg)，V 为采样实况体积(m³)。

表5-2 现场测试的气象数据参数

日期	采样起始时间	采样时间 (h)	温度 (°C)	风向	风速 (m/s)
2014 3.14	12:30	4	17.8	西北	1.9
3.21	12:30	4	21.2	西北	2.8
3.28	12:30	4	22.3	西北	3.7
4.5	12:30	4	23.1	西北	0.8
4.12	12:30	4	24.9	西北	1.4

上表列出对三个施工工地，五次建筑试验气象参数主要情况。五次试验均在下午进行，采样时间均为4h。温度随时间推移，基本上呈逐渐增加趋势。不同时刻均以西北方为主，其中4.12风速最大，为3.7m/s。

实际试验过程中，由于受道路源扩散影响，观测的浓度值为建筑源与道路源共同作用的结果，故处理时先通过AERMOD 模拟给出建筑源影响的比重，从而调整观测值，然后依据前述上下风向处理方法修正排放系数。处理方法如下：

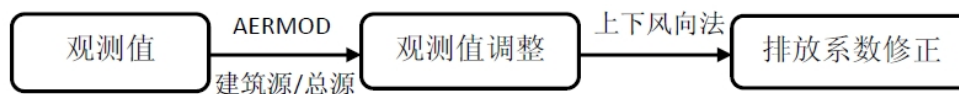


图5-8 观测值调整方法

5.4 测试结果

经过修正后，上下风向的模拟差值与观实测值的分布情况显示如下。由下图可看出，观测调整差值较模拟差值而言偏小许多，其中4.12 模拟值比观测调整值高1倍左右，3.25和4.21模拟值与观测值的结果比较相近。

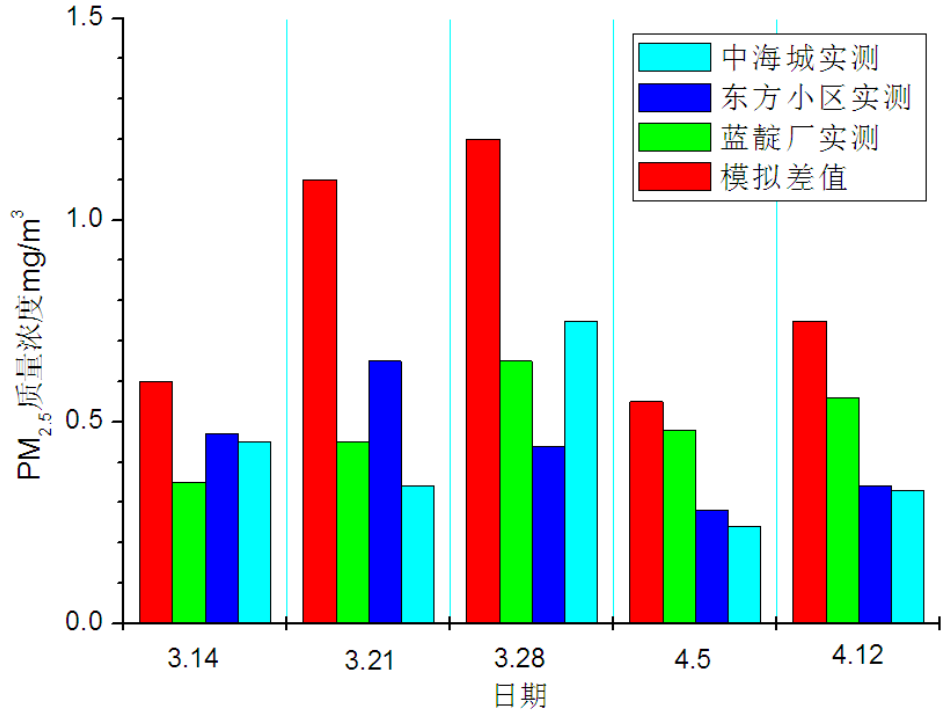


图5-8 推荐排放系数模拟差值与观测调整差值对比图

表5-3 PM_{2.5}质量浓度排放系数修正表

日期 2014	风速 (m/s)	PM _{2.5} 排放系数修正值 (千克/平方米·月)
推荐排放系数		0.0121
3.14	1.9	0.0079
3.21	2.8	0.0052
3.28	3.7	0.0042
4.5	0.8	0.0065
4.12	1.4	0.0057
平均值		0.0059

通过表5-3可以看出，PM_{2.5}排放系数修正值与风速呈负相关。通过计算的出北京地区建筑工地PM_{2.5}排放系数修正值为0.0079千克/平方米·月，通过前面的数据建筑施工工地面积为15572.1万平方米，估计平均施工时间为2个月，从而计算出每年由于建筑施工扬尘北京地区产生的PM_{2.5}为1837.5 t，炊事的对大气环境PM_{2.5}总量贡献率大致相似，本次计算忽略扬尘再悬浮过程中产生的二次颗粒物生成量。

第六章 数值计算建筑因素对大气环境 PM_{2.5} 分布特性影响

6.1 前言

本章主要供热、炊事、建筑扬尘对北京地区大气环境 PM_{2.5} 分布特性的影响，同时数值计算北京周边地区，包括京津冀地区的对北京地区大气输送的特性分析。本章节以第三章、第四章及第五章的计算统计结果为初始化边界条件，通过 **Fluent**，建立不同形式的几何模型，主要包括城区及不同环路的几何模型，从而探讨不同的建筑因素对大气中 PM_{2.5} 质量浓度分布特性。

运用 **Fuent** 数值模拟过程，首先模拟北京地区大气环流的流场分布，得出北京地区典型的大气环流流场特性，在此基础上加载离散相颗粒物，根据前面章节确定的颗粒物的总量排放以及分布特点，确定离散相颗粒物的释放总量及释放位置，二者相互耦合，从而得出 PM_{2.5} 颗粒物的浓度云图分布。对于 PM_{2.5} 颗粒，**DPM** (**Discrete Phase Models**) 模型，又被称为离散项模型，**Fluent** 中的离散相模型假定离散相非常稀疏，因此可以忽略颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响，这就意味着离散相的体积分数必须很低，一般要求颗粒相的体积分数小于 10%，而质量荷载可以大于 10%，即用户可以模拟离散相质量流速等于或大于连续相的流动。求解带有粒子存在的流动，最常用的就是离散项模型，粒子被当成离散存在的一个个颗粒，首先计算连续相流场，再结合流场变量求解每一个颗粒的受力情况获得颗粒的速度，从而得到颗粒物的分布云图。**Fluent** 提供的离散相模型功能十分强大，对稳态与非稳态流动，可以考虑离散相的刚性、曳力、重力、热用力、布朗运动等多种作用力，可以预测连续相中由于湍流涡旋的作用而对颗粒造成的影响。本章节采用随机游走轨道模型 (**DRW**)，此模型考虑了颗粒与流体的连续不断生成-消亡的离散涡之间的相互作用，每个涡团的特征由随机脉动速度和时间尺度来体现。连续相和离散相间采取了单向耦合计算，且在计算过程中做如下假设，不考虑颗粒物破碎、凝聚、蒸发，同时忽略颗粒之间相互碰撞，且颗粒的密度远远大于气流的密度，计算过程相同粒径的颗粒具有均匀的密度。

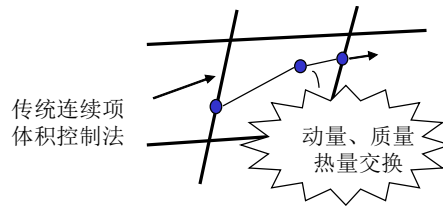
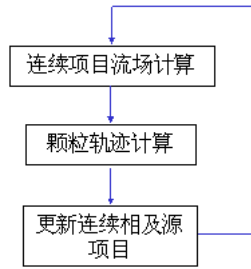


图 6-1 DPM 模型计算过程 图 6-2 体积元中连续相与离散相相互作用

同时本章节又通过 ARCGIS 空间分配数值算法，通过克里格插值 (Kriging)，进行等值离散得出不同供暖因素、炊事、建筑施工养成及周边农村地区燃料对北京大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度等值线图分布特性。

通过两种方式数值计算，定性定量探讨了不同建筑因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 分布特性影响，形象的得出了不同建筑因素的影响下大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布图。

6.2 Fluent 数值计算研究

以北京地图为几何模型的依据，对其进行网格划分，划分网格数量为 5800000 个 (如图 6-3 所示)，网格包括结构化网格和非结构化两类，其中结构化网格包括四面体网格和三角锥网格。仅单纯考虑北京地区大气环流现象，同时考虑典型日的气象条件，模拟出北京地区的连续流场分布如下图 4-4 所示。

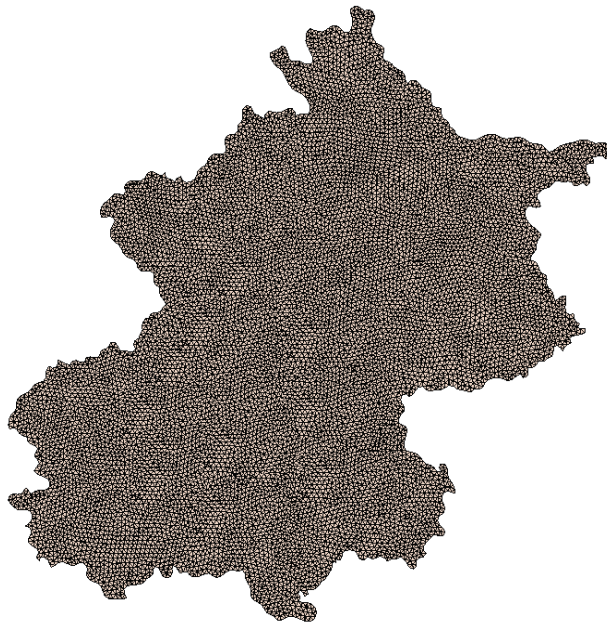


图 6-3 北京区域网格图形

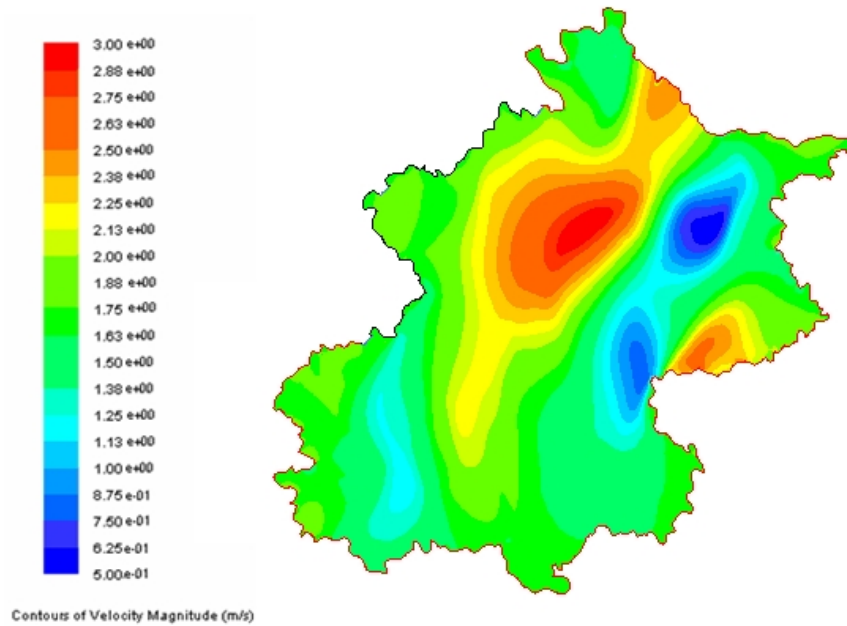


图 6-4 典型日北京区域连续流场分布

从图 6-4 可以看出典型气候日，北京区域连续流场最大气流速度在 3.0m/s，普遍速度分布在 2.0m /s，西北部区域流速较大，东南部区域速度分布较小。在模拟计算北京地区连续流场的基础上，计算 $PM_{2.5}$ 浓度云图分布。首先本文重新建立不同环流的集合模型，同时对其划分网格，网格数量 6420000 个，采用结构化网格与非结构化网格结合的方式，划分集合模型如图 6-5 所示。

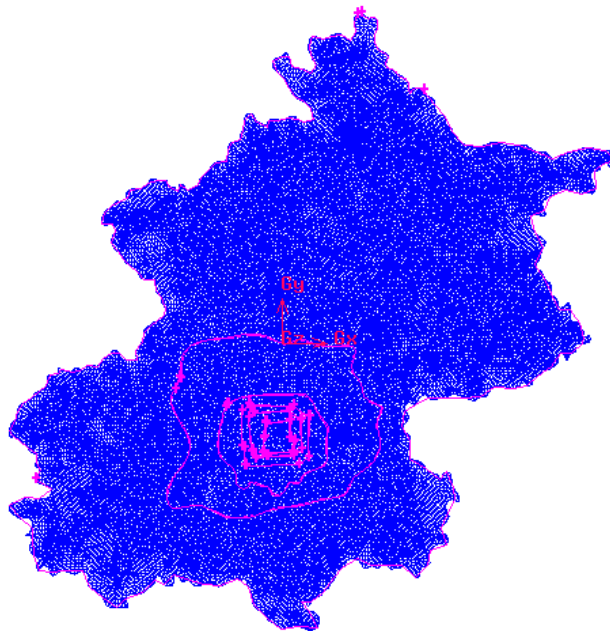


图 6-5 北京不同环路分布几何网格模型

此模型包括主要北京二环以内区域、二环至三环内区域、三环至四环内区域、四环至五环内区域、五环至六环内区域、六环以外区域，其中六环以外区域的边界区域等。首先以采暖为边界条件，以不同环路的锅炉的类型及数量做为基础数据，不考虑其他的因素，仅考虑锅炉作为 $PM_{2.5}$ 源头，同时结合气流的自由对流扩散得出 $PM_{2.5}$ 浓度云图分布情况如图 6-6 所示。

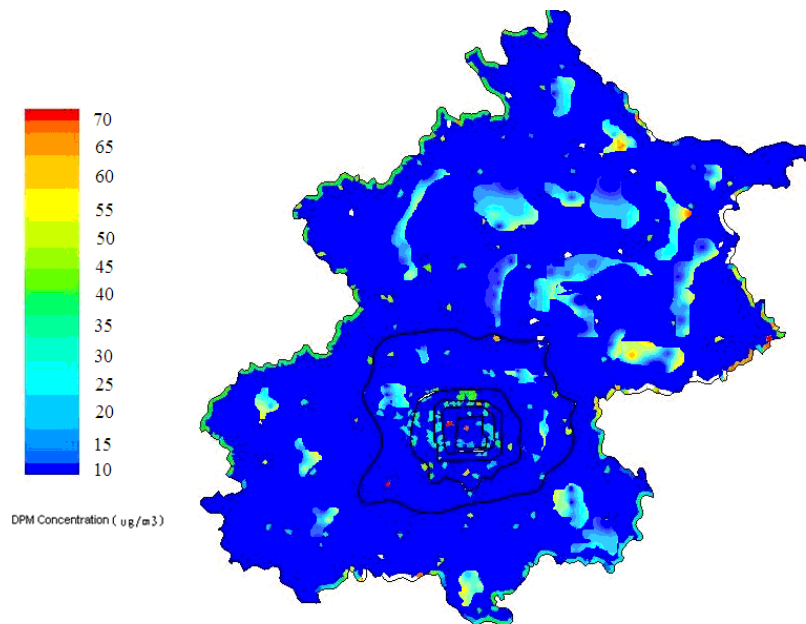


图 6-6 供暖因素对大气环境 $PM_{2.5}$ 质量浓度云图分布影响

图 6-6 展示了仅仅考虑锅炉排放时，北京不同环路区域大气环境中 $PM_{2.5}$ 典型的云图分布，从此图可以看出，四环以外区域 $PM_{2.5}$ 质量浓度较高，而四环内 $PM_{2.5}$ 较低。由于四环外燃煤锅炉较多，所以造成四环外， $PM_{2.5}$ 浓度较高，而四环内主要以燃气锅炉为主，相对于 $PM_{2.5}$ 排放量较小，当气流扩散速度较低的时候，冬季采暖期，外环路 $PM_{2.5}$ 浓度较高，而四环内 $PM_{2.5}$ 浓度较低。从该图可以看出仅仅考虑采暖因素，北京局部区域 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高达 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $PM_{2.5}$ 质量云图呈现团簇状，区域化分布。

图 6-7 清晰展示了建筑施工扬尘对大气环境 $PM_{2.5}$ 质量浓度云图分布影响，从此图可以看出，各环路之间 $PM_{2.5}$ 呈非均匀分布，质量浓度相差较大，其中内环明显高于外环，最高浓度不超过 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，出现这种现象的主要原因是因为建筑工地不均匀分布所致，因此不同区域产生 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现非均匀分布，在不考虑北京不同区域大气扩散前提下，从而出现了不同环路之间 $PM_{2.5}$ 质量浓度不均匀分布特性。本次模拟的边界条件是根据第五章建筑施工扬尘计算结果而得，其中不同源的释放强度根据面积和释放强度计算而得。

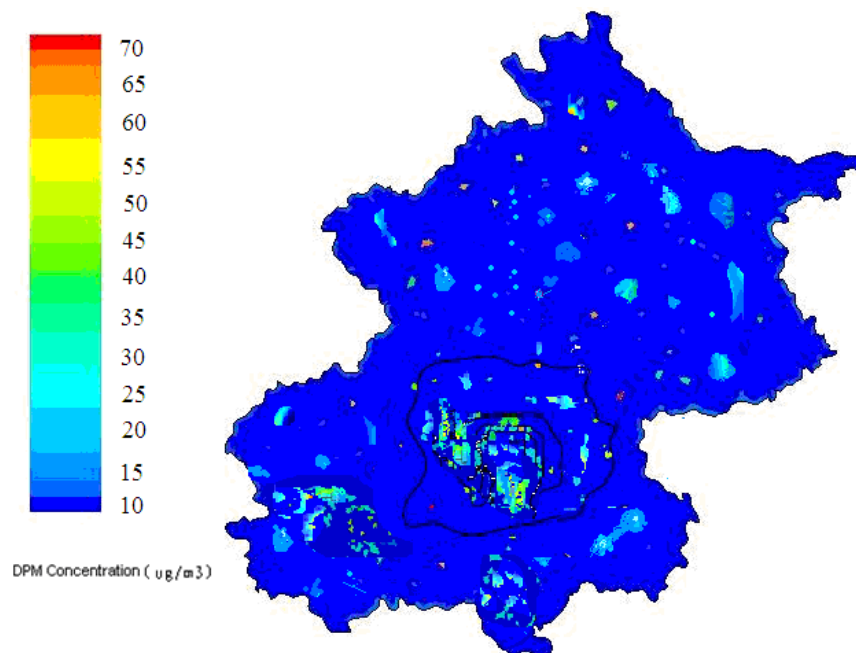


图 6-7 建筑施工扬尘对大气环境 $PM_{2.5}$ 质量浓度云图分布影响

图 6-8 清晰展示了单独考虑炊事输入情况下，北京不同区域 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布特征，从此图可以看出，五环内大气环境 $PM_{2.5}$ 质量浓度较高，五环外大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度较低。出现这种现象主要原因可能与人口数量分布相关，人口在一定程度上决定了炊事对大气环境 $PM_{2.5}$ 的排放量。从第四章可知，炊事产生的 $PM_{2.5}$ 总量与人口具有密切关系，从城区人口分布可以知道，北京五环内，人口密度较大，而五环外人口密度较小，从而造成了 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布具有不均性。从图 6-7 可以看出，炊事对大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响最高在 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其中大部分区域为 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。炊事最为影响带大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度排放的重要因素，在一定程度与人口密度高度相关，在王冰等人的研究中也提到这一点。厨房炊事 $PM_{2.5}$ 具有连续性，可控性性和与人口相关的相对集中性特点，本文数值模拟的结果也能够清晰的看出这一点。炊事活动产生的颗粒物粒径普遍较小，因此 $PM_{2.5}$ 所占比例普遍较高，如何合理的控制厨房炊事对于大气环境质量的改善具有重要意义。

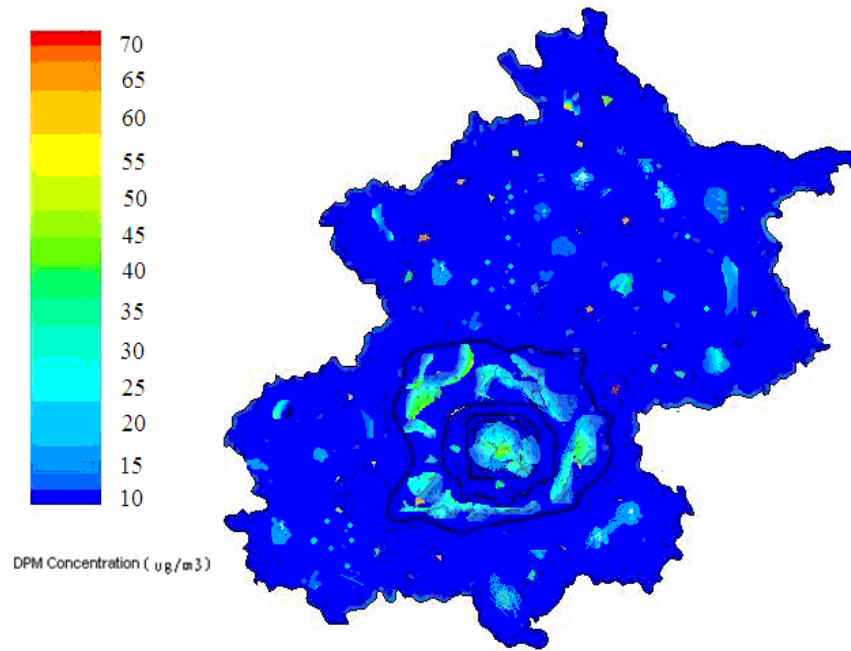


图 6-8 炊事对大气环境 $PM_{2.5}$ 质量浓度云图分布影响

本课题除了对不同环路区域 $PM_{2.5}$ 进行了详细探究，同时也探讨了不同行政区域中大气环境质量 $PM_{2.5}$ 的质量浓度，几何模型如图 6-9 所示，几何模型包括了城六区（东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山）以及远郊区县十区（通州、顺义、平谷、怀柔、密云、延庆、昌平、门头沟、房山、大兴）。其中网格数量与网格划分的方式如前所列。

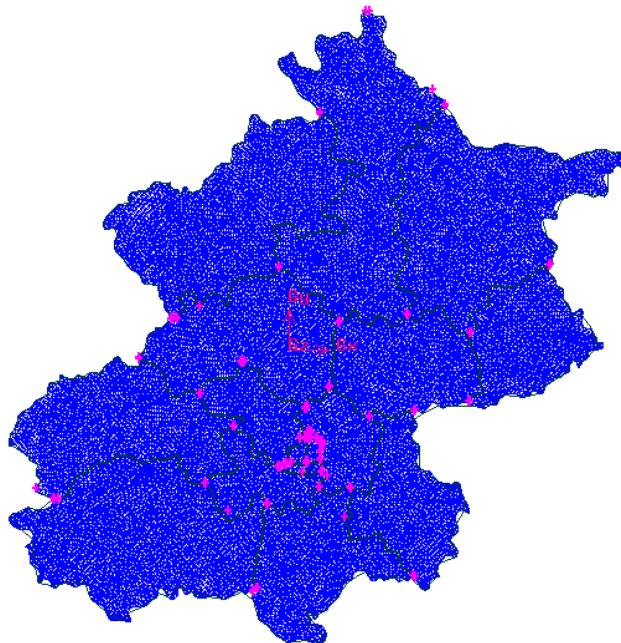


图 6-9 北京不同行政区域的网格化几何模型

图6-10展示了采暖因素对不同行政区大气环境中PM_{2.5}质量浓度云图的特性分布，从此图可以看出昌平、房山、大兴、顺义、朝阳、丰台PM_{2.5}浓度较高，其余PM_{2.5}区县浓度较低。此图合算的过程中以各个区县不同种类的燃料产生PM_{2.5}总量为数值计算依据，通过加载大气自然环流连续项得出不同行政区域的PM_{2.5}质量浓度分布。从此图可以看出不同行政区域内大气环境中PM_{2.5}最高浓度为50ug/m³。而出现这种分布主要原因，因为昌平、房山、大兴、顺义、朝阳、丰台应的燃煤锅炉数量较多，产生的PM_{2.5}质量浓度较高有关。

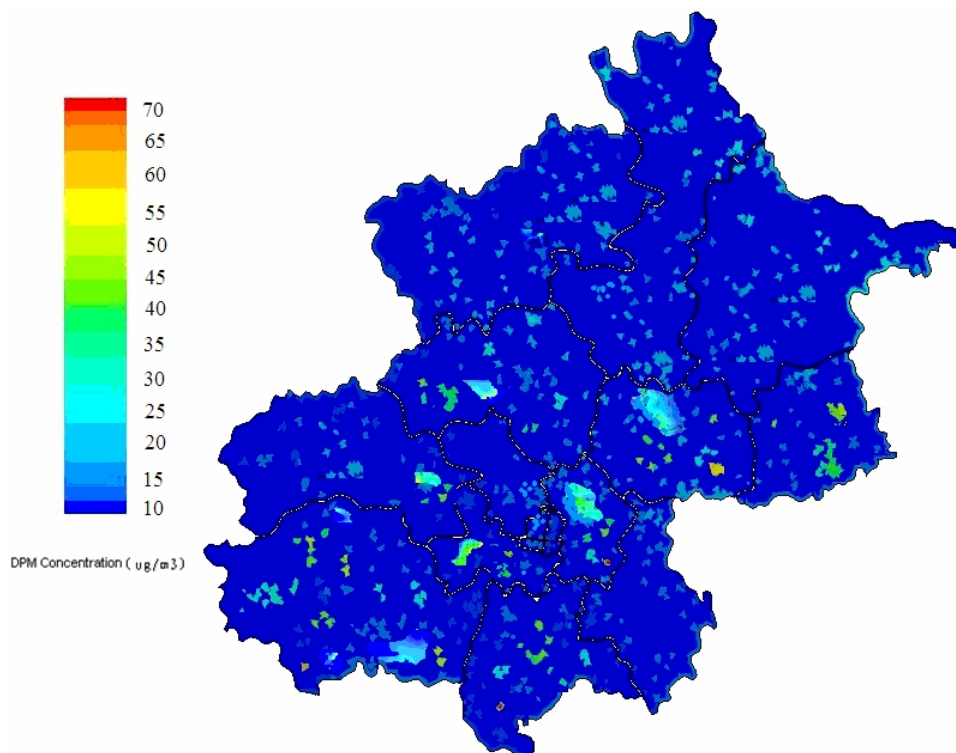


图 6-10 采暖因素对不同行政区大气环境中 PM_{2.5} 质量浓度分布影响

图 6-10 清晰的展示了北京不同行政区域建筑施工扬尘对大气环境中 PM_{2.5} 质量浓度，此次模拟基于不同行政区建筑施工工地面积而确定的输入条件，从此图可以清楚的看到不同行政区域建筑施工扬尘对大气环境中 PM_{2.5} 排放特性影响呈现非均匀分布，不同行政区域 PM_{2.5} 质量浓度相差较大，出现这种现象的原因主要由于建筑施工工地不均匀分布所致。从图 6-10 可以看出，仅考虑建筑施工工地的对大气环境中 PM_{2.5} 浓度影响，其最高浓度不超过 35ug/m³。建筑施工扬尘产生的 PM_{2.5} 属于无组织排放，由于相对较大的排放面积，在不考虑大气扩散的前提下，建筑施工扬尘产生的 PM_{2.5} 质量浓度出现不均与现象，此次数值模拟忽略了二次扬尘的再生源。

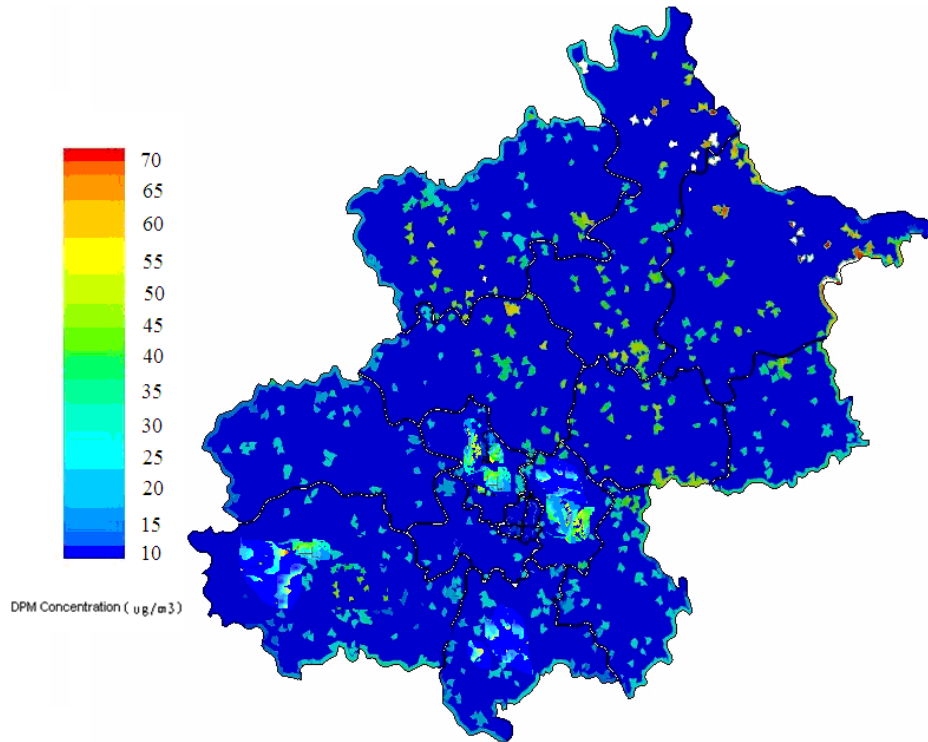


图 6-11 建筑施工扬尘对不同行政区大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布影响

图 6-11 模拟了不同行政区炊事因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响。从图 6-11 可以清晰的看出，城六区（东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山） $PM_{2.5}$ 浓度较高，其余京外十区（通州、顺义、平谷、怀柔、密云、延庆、昌平、门头沟、房山、大兴）浓度较低，城六区人口密度较大，且人口数量较多，从而其城六区 $PM_{2.5}$ 浓度较高。

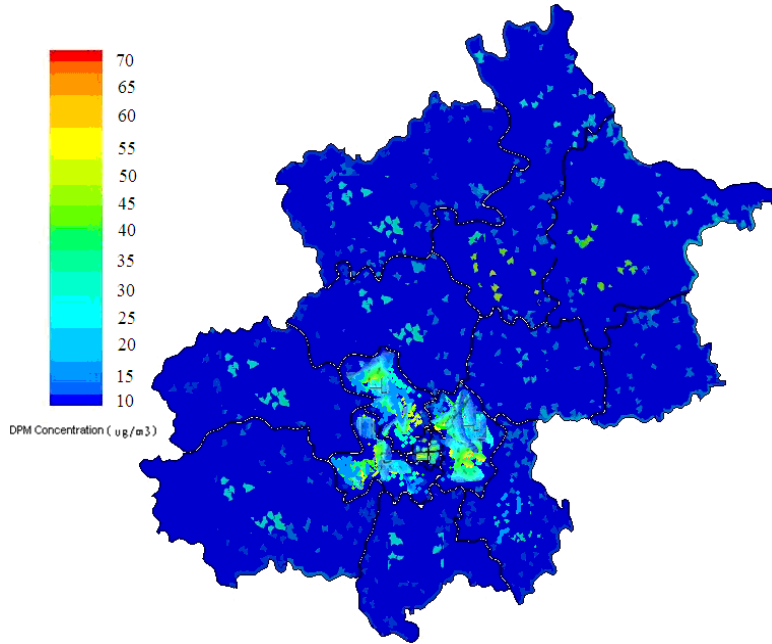


图 6-12 炊事对不同行政区大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布影响

本研究同时探讨了津冀地区对北京大气环境 $PM_{2.5}$ 质量浓度输送影响。图 6-12 为建立的采暖季典型的集合模型。北京冬季一般为西北方向，以京津冀环路区域作为源项，考虑其对北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 浓度影响。

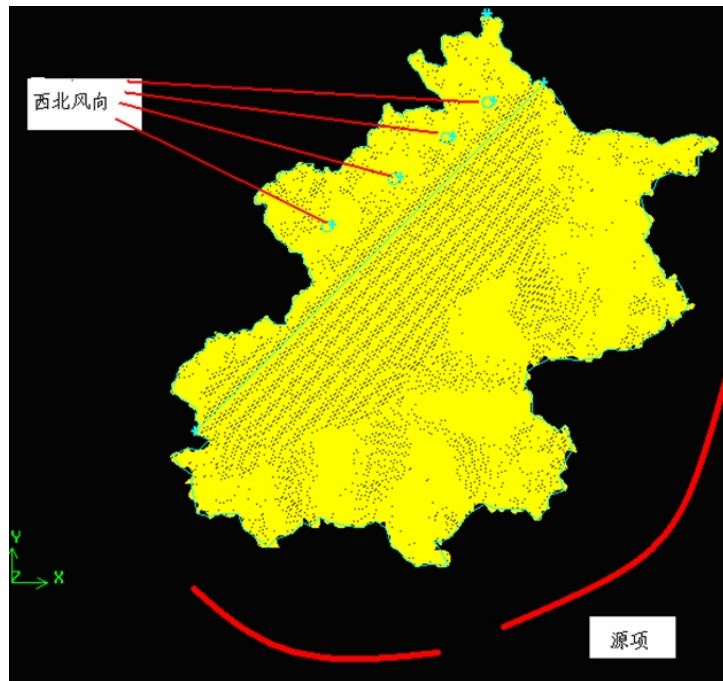


图 6-13 考虑京津冀源项的典型的几何网格模型

北京地区，冬季风向为西北风风向，风速一般为 1-3m/s，京津冀地区位于下

风向，考虑京津冀周边地区北京 $PM_{2.5}$ 输送作用，将其周边地区定义为输入源项。当西北风速较大的时候，不利京津冀地区对北京地区 $PM_{2.5}$ 输运过程，当无风的时刻，京津冀对北京地区输运 $PM_{2.5}$ 的现象比较严重。此几何网格数量为 685000，采用几何网格和非几何网格，其中网格质量在 0.9 以上。同时采用以 MCIP 气象化学模块进行离散。

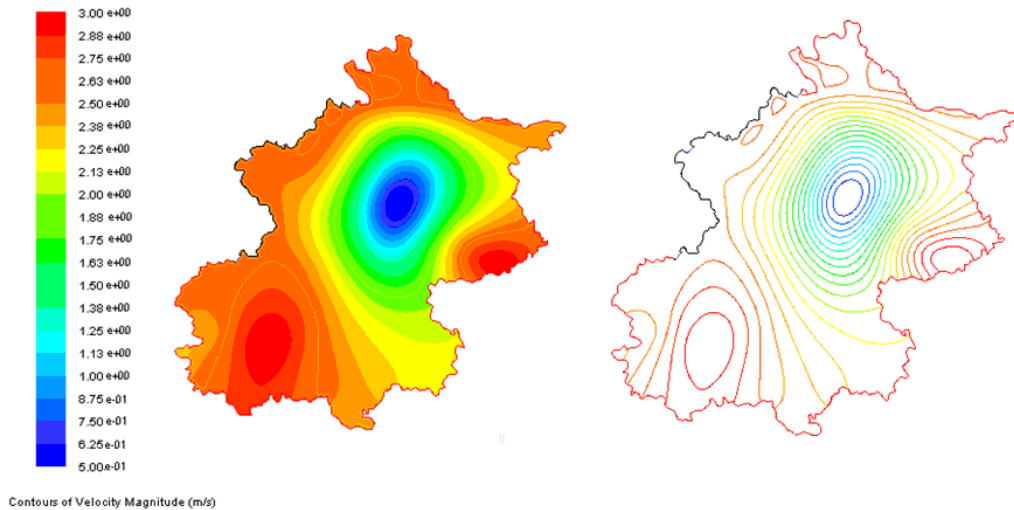


图 6-14 无风状态采暖季北京地区典型流场分布

无风状态采暖季北京地区典型流场分布如图 6-14 所示，综合北京市气象条件及城市热岛效应，北京东东北部和西南部存在涡流区，其流场特性导致气流及 $PM_{2.5}$ 的滞留，最大气流速度范围约为 $3m/s$ ，较大的气流速度分布在北京周边。速度分布均匀性较差，四周风速相对较大，而城区内部较小，出现这种现象的主要原因可能与建筑布局有关。

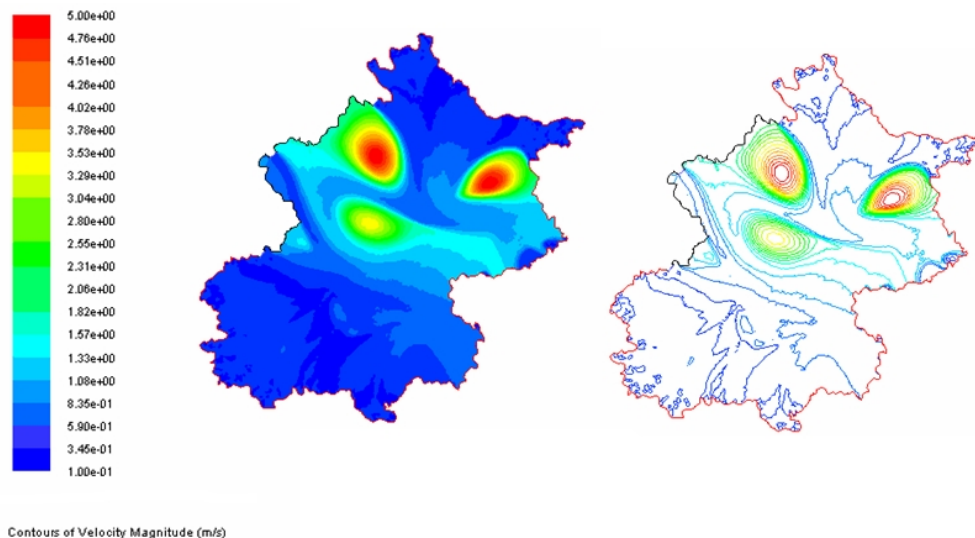


图 6-15 西北方向状态采暖季北京地区典型流场分布

北京冬季存在西北风向时候，最大气流速度为 5m/s，北京城区内部气流速度较大，而周边地区速度相对而言速度较小，速度较大分布在西北和东北部区域。较大的城区内部气流速度增强了气流扩散和横向输运能力较强，从而有利于 PM_{2.5} 扩散和输运。

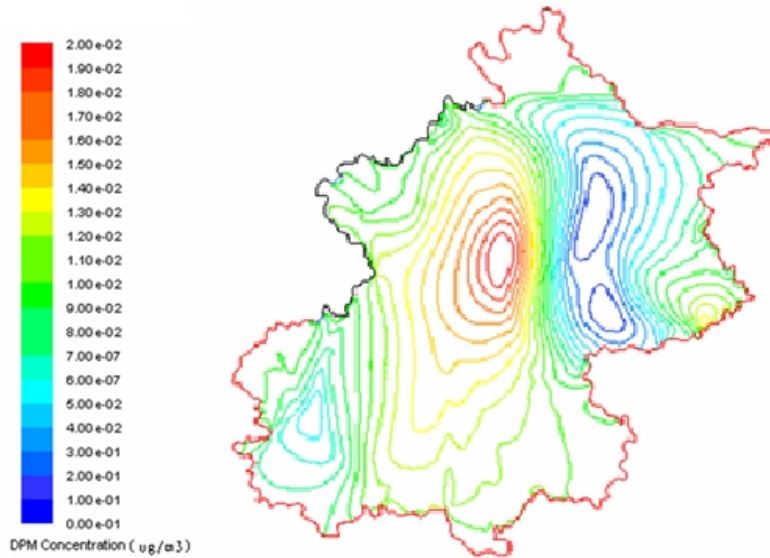


图 6-16 忽略京津冀扩散作用北京市 PM_{2.5} 浓度分布影响

当只考虑北京内部 PM_{2.5} 来源时，北京冬季某供暖日典型时刻 PM_{2.5} 等值线图分布如图 6-16 所示，从图可以看出 200ug/m³，其最高浓度值分布区域位于昌平和怀柔交界位置。

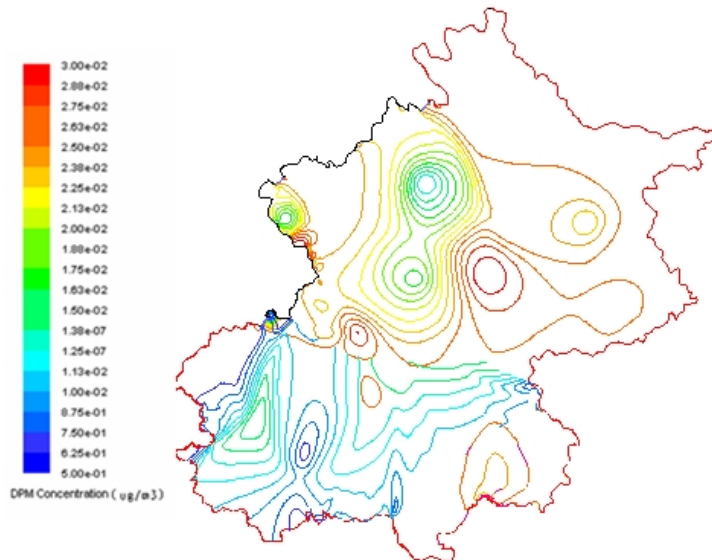


图 6-17 考虑京津冀扩散作用北京市 PM_{2.5} 浓度分布影响

考虑京津冀为 $PM_{2.5}$ 污染源时候,北京冬季 $PM_{2.5}$ 等值线分布如图 6-17 所示,从该图可以看出,靠近京津冀的地方 $PM_{2.5}$ 浓度较高,且最高浓度达到 $300\mu g/m^3$,京津冀污染源扩散对北京地区的影响非常显著。

6.3 Arcgis 数值计算研究

由于北京周边农村地区供热燃料燃烧数据不够全面,不能合理确定其数值计算的边界条件,故需要通过 Arcgis 进行数值插值法进行数值计算模拟,其对北京地区的大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响。通过问卷调查的部分数据,结合《中国统计年鉴》《北京市统计年鉴》,通过对与污染物排放有关的统计数据进行了整理,作为污染物排放量推估和空间分配的依据。空间数据的整理包括两部分:一是地理信息数据整理;二是排放数据网格化。中国基础地理信息系统数据库提供了中国县级行政区界数据,同时也提供了直辖市各区的行政区界数据。之后,将最小单元为区、县的排放量平摊到区县面上,应用 Arcgis 的空间数据处理功能,对此排放量进行切分,切分后区县的边界与模式网格相交划分成许多小区域,这些区域既属于某一个区县又属于某一个模式的网格,将属于同一个模式网格的小区域合并就得到了此网格的排放量。最后得出北京周边农村地区对北京市 $PM_{2.5}$ 大气环境质量浓度云图,从图 6-18 可以看出,仅仅考虑北京周边地区采暖因素对北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,从此图可以看出,北京最高 $PM_{2.5}$ 为 $40\mu g/m^3$,其对北京不同行政区域影响较为均匀,西北部的 $PM_{2.5}$ 质量浓度略高于其他区域。

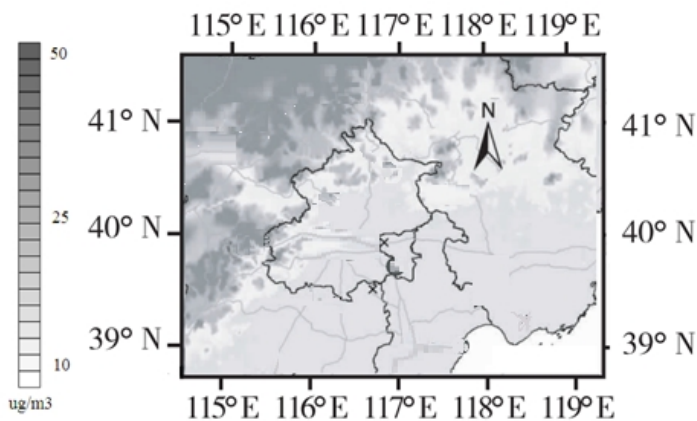


图 6-18 周边农村地区对北京市 $PM_{2.5}$ 浓度分布影响

第七章 定量评估相关措施对 PM_{2.5} 减量化特征影响

7.1 前言

PM_{2.5} 作为当今最受关注的环境问题，除了探讨 PM_{2.5} 的污染来源、影响特征、污染机制、化学组分、危害特征以外，更多人更加关注如何有效控制 PM_{2.5} 质量浓度，同时减少雾霾的爆发。通过采取有效的手段，控制或减少 PM_{2.5} 的质量浓度，至关重要。

通过前面章节探讨不同建筑因素（采暖、炊事、建筑施工扬尘）对大气环境 PM_{2.5} 的影响，定量得出了不同建筑因素对大气环境的贡献总量，同时得出了不同建筑因素对大气环境中 PM_{2.5} 质量浓度分布特性影响。基于前面章节的研究结果，本章节主要从提高建筑节能标准、可再生能源应用、清洁能源替代以及降低冬季供热温度等建筑相关措施方面入手，定量评估其对大气环境中 PM_{2.5} 减量化特征的影响。表 7-1 是本次研究中统计的共建和住在不同能耗标准的下的面积，从此表可以看出，公建面积合计 8532 万平方米，其中非节能共建为 3007 万平方米，节能共建为 5525 万平方米；住宅建筑合计 30721 万平方米，其中非节能住宅面积为 6506 万平方米，一步节能住宅为 6485 万平方米，二步节能住宅面积为 10327 万平方米，三步节能面积为 7403 万平方米。

表 7-1 北京不同行政区不同类型建筑面积分布（万平方米）

行政区县		公建		住宅			
		非	节能	非	一步	二步	三步
城六区	东城	157	118	325	214	267	82
	西城	148	116	512	321	265	137
	朝阳	566	610	1570	1196	2116	1218
	海淀	792	842	1358	1249	1787	693
	丰台	397	661	1496	660	1033	1051
	石景山	60	85	128	124	96	97
	小计	2120	2432	5389	3764	5564	3278
远郊区县	通州	138	211	228	271	758	912
	顺义	112	615	134	271	589	878
	平谷	14	204	97	200	180	91
	怀柔	134	189	36	215	54	115
	密云	157	147	16	91	354	400
	延庆	21	206	40	56	209	69
	昌平	123	454	156	542	1703	523
	门头沟	54	112	95	96	89	122

	房山	67	412	164	567	592	393
	大兴	67	543	151	412	235	622
	小计	887	3093	1117	2721	4763	4125
区县合计		3007	5525	6506	6485	10327	7403

表 7-2 北京不同行政区不同燃料类型能耗指标（单位：千克标煤/平方米）

	燃煤单耗	燃油单耗	燃气单耗	电及其它单耗	平均单耗
东城	0.0	133.1	11.5	21.9	17.8
西城	0.0	52.4	11.2	16.3	14.1
朝阳	12.1	123.5	10.8	5.1	13.1
海淀	23.5	91.9	11.0	13.1	15.0
丰台	16.8	17.0	15.8	10.1	16.6
石景山	22.1	14.3	5.9	0.0	11.2
小计	16.7	82.8	11.8	12.4	14.7
通州	28.3	0.0	5.5	0.0	14.5
顺义	15.9	0.0	11.2	2.4	14.5
平谷	20.7	0.0	0.0	0.0	20.7
怀柔	25.4	0.0	0.0	0.0	25.3
密云	20.7	0.0	0.0	0.0	20.7
延庆	27.2	0.0	0.0	0.0	26.9
昌平	18.4	14.7	12.3	11.5	17.7
门头沟	13.5	23.3	0.0	16.0	20.9
房山	21.2	0.0	13.5	0	20.0
大兴	20.2	0.0	11.3	0.0	19.4
小计	20.1	48.3	8.0	1.5	18.4
总计	19.2	80.9	11.3	8.2	16.3

表 7-2 为不同行政区不同燃料的能耗指标，对于燃煤单耗来说，通州最高为 28.3 千克标煤/平方米，其次为延庆为 27.2 千克标煤/平方米，其中朝阳燃煤单耗最低为 12.1 千克标煤/平方米，由于东城西城无燃煤锅炉，其燃煤单耗为 0，平均燃煤单耗为 19.2 千克标煤/平方米。对于燃油单耗而言，东城的燃料单耗最高为 133.1 千克标煤/平方米，通州、顺义、平谷、怀柔等京外区县无燃油锅炉，其燃油指标为 0，燃油平均单耗为 80.9 千克标煤/平方米；对于燃气单耗来说，丰台最高为 15.8 千克标煤/平方米，燃气平均指标为 11.3 千克标煤/平方米。最终计算北京不同行政区的平均单耗，延庆最高为 26.9 千克标煤/平方米，其次为怀柔为 25.3 千克标煤/平方米，石景山最低为 11.2 千克标煤/平方米，全市平均单耗为 16.3 千克标煤/平方米。通过整体核算得出不同类型住宅建筑能耗指标分别为非节能建筑为 25.2 千克标煤/平方米，一步节能建筑为 17.4 千克标煤/平方米，二步

节能建筑为 12.4 千克标煤/平方米，三步节能建筑为 8.2 千克标煤/平方米；对于非节能共建耗能指标为 39.5 千克标煤/平方米，节能公共建筑耗能指标为 29.6 千克标煤/平方米。

7.2 节能标准提高对 PM_{2.5} 减量化影响

目前不同类型住宅所及公建所占比例如图 7-1 和 7-2 所示。就目前统计数据而言，对于住宅建筑，其中非节能建筑所占比例为 21.18%，30% 节能建筑所占比例为 21.11%，50% 节能建筑所占比例为 33.62%，65% 节能建筑所占比例为 24.10%；对于公共建筑其中节能建筑所占比例为 64.76%，非节能建筑所占比例为 35.24%。

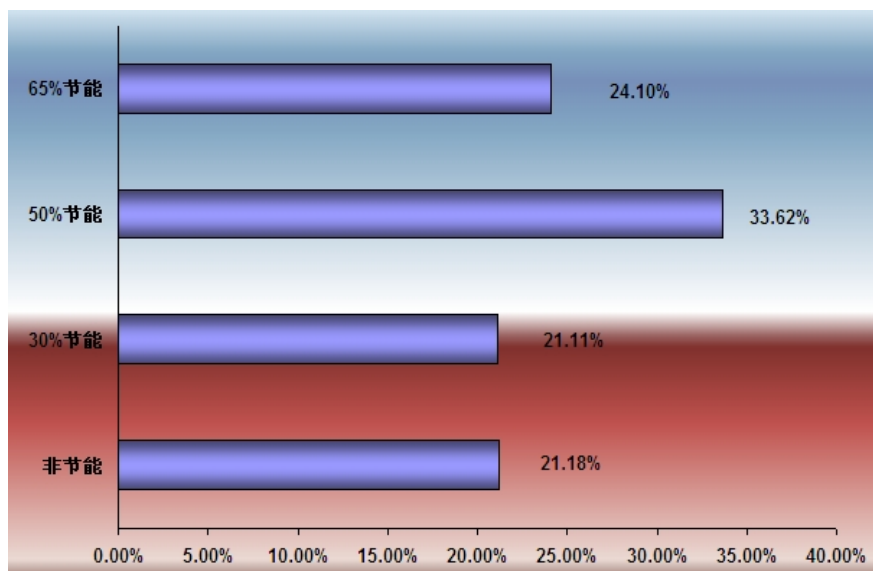


图 7-1 不同类型住宅建筑所占比例

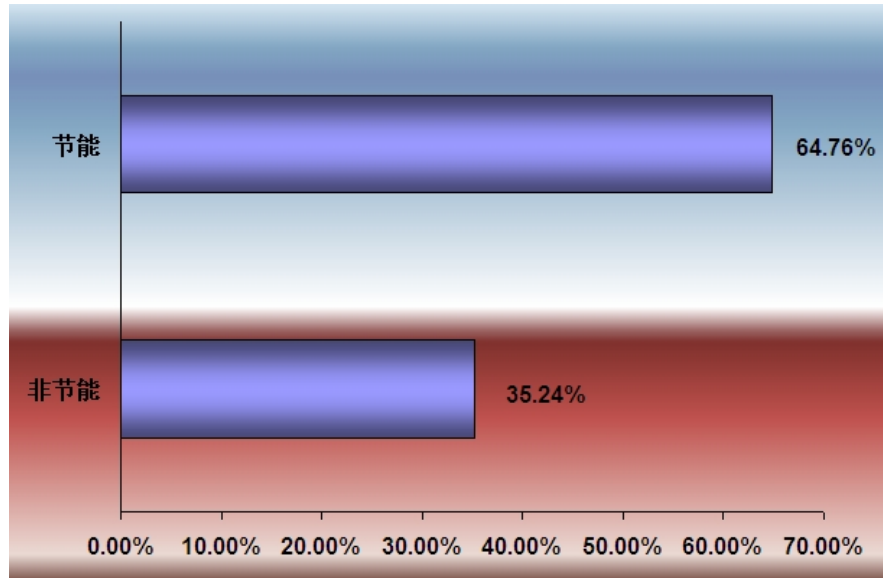


图 7-2 不同类型公共建筑所占比例

综合北京地区经济条件、技术条件下，通过 TRNSYS 数值模拟确定 2016 年不同类型住宅及公共建筑所占比例如图 7-3 和 7-4 所示。

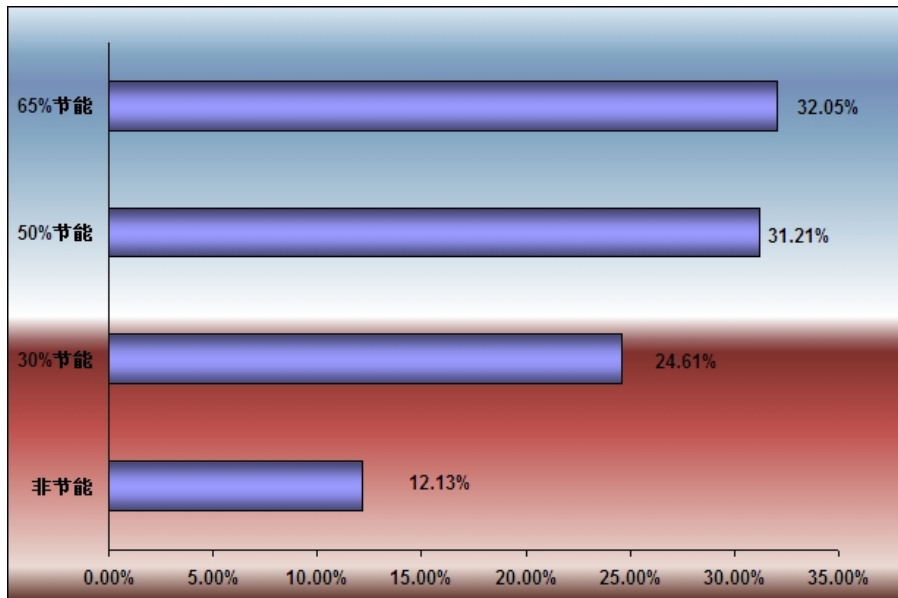


图 7-3 提高节能标准后不同类型住宅建筑所占比例

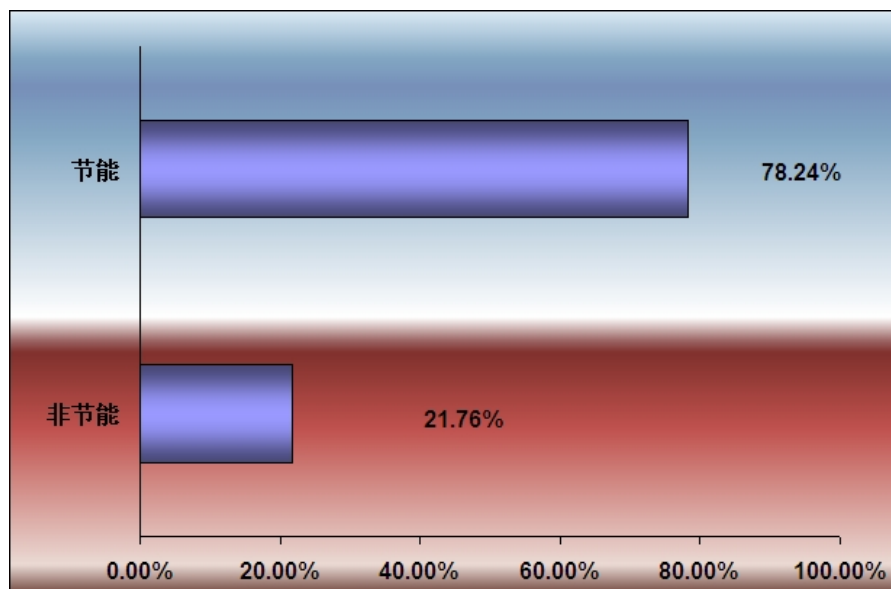


图 7-4 提高节能标准后不同类型公共建筑所占比例

从上图可以看出截止 2016 年,对于住宅建筑,非节能建筑所占比例为 9.13%, 30% 节能建筑所占比例为 15.61%, 50% 节能建筑所占比例为 22.21%, 65% 节能建筑所占比例为 26.05%, 75% 节能建筑比例为 27.01%; 对于公共建筑节能建筑所占比例为 78.24%, 非节能建筑所占比例为 21.76%。

提高建筑能耗标准前,不同类型住宅建筑总的耗煤量为 4655496tce,不同类型的公共建筑总的耗煤量为 2823165tce; 提高建筑节能标准后,不同类型的住宅建筑耗煤量为 3950877tce,不同类型的公共建筑总的耗煤量为 2709272 tce, 提高建筑标准总计节约标准煤 518512t, 根据北京目前供热燃料的结构组成,其中煤占有比例为 57.82%, 天然气占有比例为 36.52%, 油占有比例为 4.92%, 根据第二章确定的不同类型燃料 $PM_{2.5}$ 的排放因子,即煤—1.56kg/tce、天然气—0.08kg/tce 和油—0.4044kg/tce, 从而得到 $PM_{2.5}$ 的减排量总量为 1209t。

7.3 降低供热温度对 $PM_{2.5}$ 减量化影响

图 7-5 和图 7-6 清晰的展示了不同类型建筑的耗煤量,从以下两图可以清晰的看出,对于住宅建筑而言,非节能建筑、一步节能建筑、二步节能建筑和三步节能建筑所消耗的标准煤量分别为 1639512t, 1128390t, 1280548t, 607046t。对于公共建筑节能建筑和非节能建筑消耗的标准煤量为 1635400t 和 1187765t。对于住宅建筑而言,非节能建筑的耗热指标为 $31.97W/m^2$,一步节能建筑的耗热指标为 $25.5 W/m^2$,二步节能建筑的耗热指标为 $20.6W/m^2$,三步节能建筑的耗热指标为 $14.65W/m^2$; 对于公共建筑而言,非节能建筑的 $50.11 W/m^2$,节能建筑的耗

热指 $37.5\text{W}/\text{m}^2$ 。

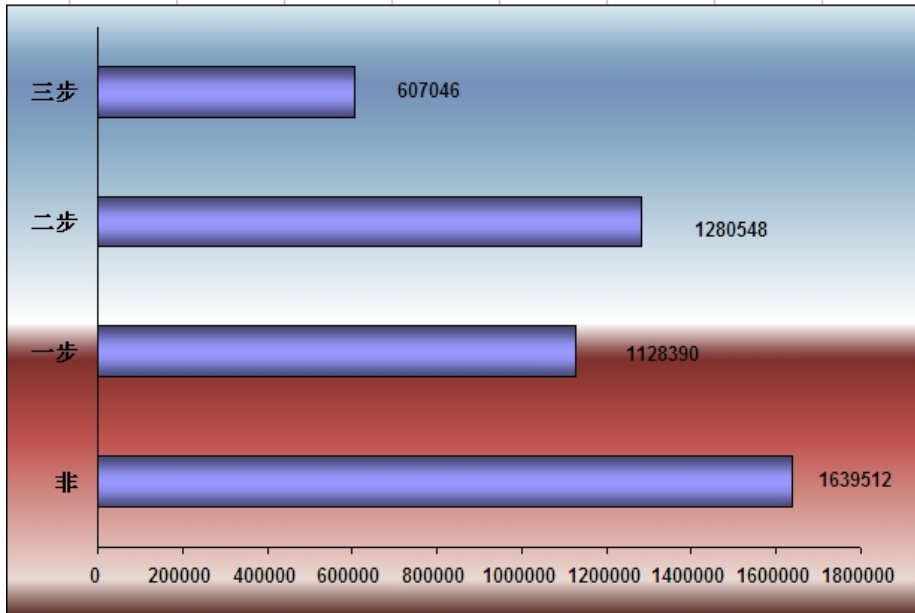


图 7-5 不同种类住宅建筑的耗煤量 (t)

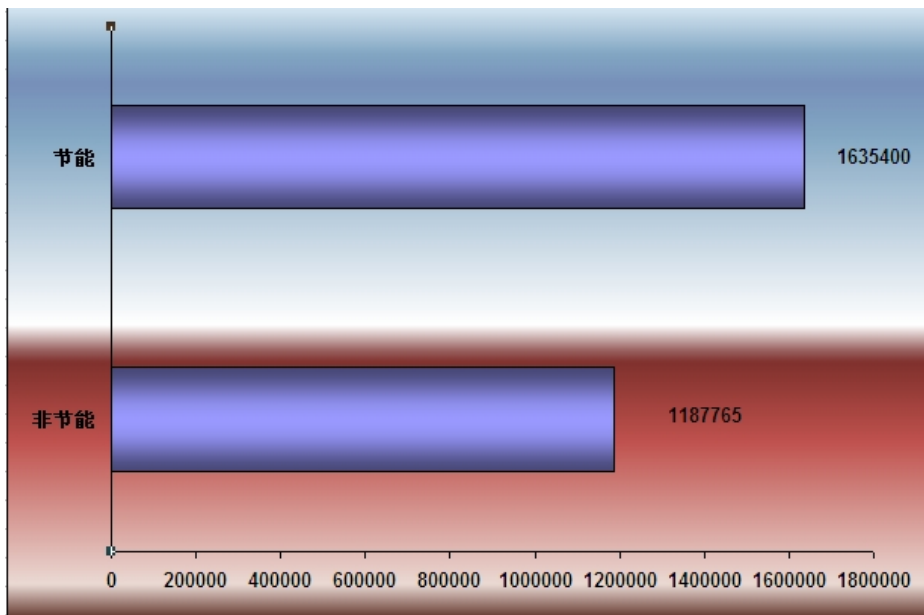


图 7-6 不同种类公共建筑耗煤量 (t)

本课题组通过对不同类型建筑进行统计，对于住宅而言，非节能建筑冬季采暖室内环境平均温度 20°C 左右，一步节能建筑冬季采暖室内环境平均温度 22°C 左右，二步节能建筑冬季采暖室内环境平均温度 24°C 左右，三步节能建筑冬季采暖室内环境平均温度 25°C 左右；对于公共建筑而言，非节能建筑与节能建筑平均温度为 23°C 和 26°C 左右。如果采取紧急措施，平均降低供热温度 2°C ，最

终得到不同类型的建筑耗煤量如图 7-7 和图 7-8 所示。

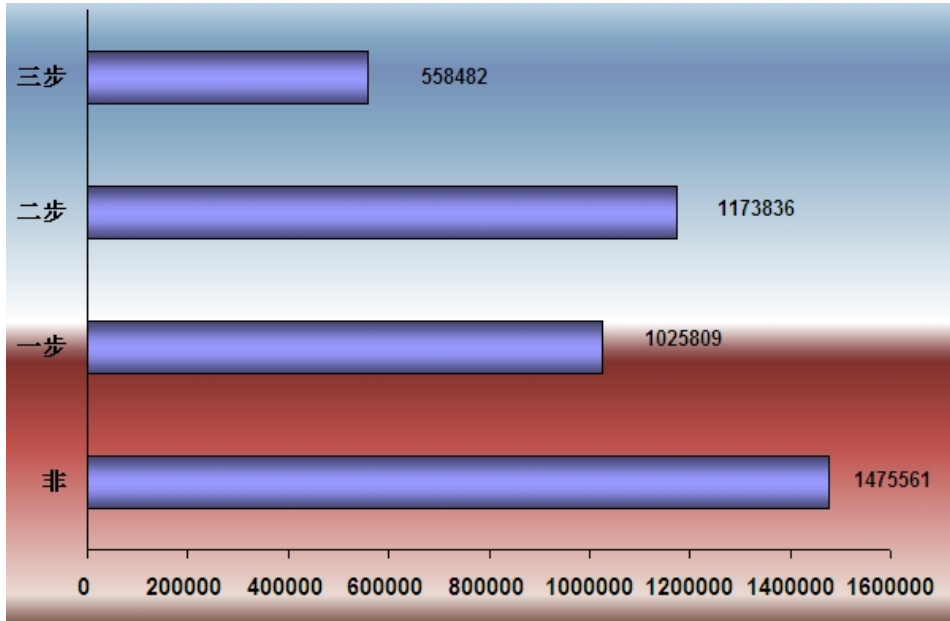


图 7-7 降低供热温度后不同类型住宅建筑的耗煤量 (t)

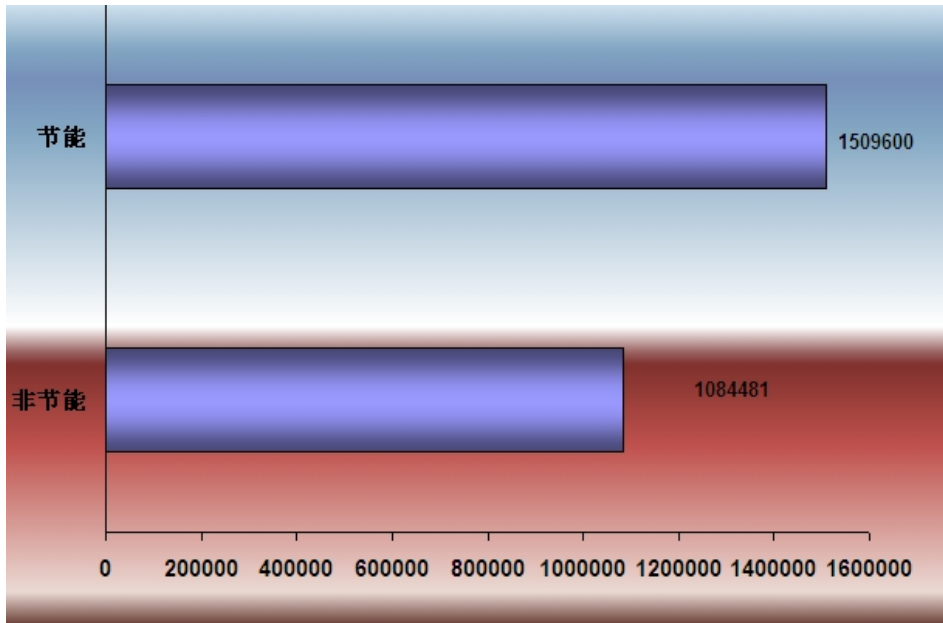


图 7-8 降低供热温度后不同类型公共建筑耗煤量 (t)

通过计算可得，对于住宅建筑而言，非节能建筑节能标准煤 163951t，一步节能建筑节能标准煤 102581t，二步节能建筑节能标准煤 106712t，三步节能建筑节能标准煤 48564t；对于公共建筑而言，非节能建筑节能标准煤为 103284t，节能建筑节能标准煤为 12500t，共计节约标准煤 650892t，根据北京目前供热燃料的结构组成，其中煤占有比例为 57.82%，天然气占有比例为 36.52%，油占有

比例为 4.92%，根据第二章确定的不同类型燃料 PM_{2.5} 的排放因子，即煤—1.56kg/tce、天然气—0.08kg/tce 和油—0.4044kg/tce，从而得到 PM_{2.5} 的减排量总量为 608t。

7.4 可再生能源使用对 PM_{2.5} 减量化影响

根据北京市“十二五”时期民用建筑节能规划，截止 2015 年，北京市不同类型采用不同形式的可再生能源，节约标准煤分别为，采用浅层地热或污水源热泵采暖、制冷的民用建筑 1800 万平方米，节约标准煤 14 万吨，太阳能光电一体化建筑 100 万平方米屋顶面积，4 万千瓦光伏发电能力，节约标准煤 2.97 万吨，使用太阳能热水系统的建筑面积 11000 万平方米，集热器面积 550 万平方米，节约标准煤 39.6 万吨，使用太阳能光热系统采暖的民用建筑 16 万平方米，集热器面积 4 万平方米，节约标准煤 0.37 万吨。北京市采用可再生能源对常规能源替代总计节约标准煤 56.94 万吨，总计可以减少 PM_{2.5} 排放量为 888t。

表 7-3 不同类型的可再生能源应用节约标准煤量

可再生 能源 建筑 应用	采用浅层地热或污水源热泵采暖、制冷的民用建筑 1800 万平方米	14 万吨标准煤
	太阳能光电一体化建筑 100 万平方米屋顶面积，4 万千瓦光伏发电能力	2.97 万吨标准煤
	使用太阳能热水系统的建筑面积 11000 万平方米，集热器面积 550 万平方米	39.6 万吨标准煤
	使用太阳能光热系统采暖的民用建筑 16 万平方米，集热器面积 4 万平方米	0.37 万吨标准煤

7.5 新建、改建节能建筑对 PM_{2.5} 减量化影响

预计北京市 5 年内新增建筑 2 亿平方米，按照目前能耗指标，其耗煤量为 328.9 万吨标准煤，其中公建为 0.7 亿平方米，全部为节能公建，住宅建筑为 1.3 亿平方米，其中住宅有 50% 执行 65% 节能标准，剩余 50% 执行 75% 节能标准，共计耗煤量为 135.78 万吨标准煤，全面提升建筑节能标准可以节约标准煤 193.12 万吨。拆除既有非节能建筑，其中拆除城镇非节能建筑 1000 万平米，拆除农村非节能建筑 4000 万平米，并重建为节能建筑，平均城镇非节能建筑耗能为 20 千克标准煤/平方米，而农村非节能建筑为 17.5 千克标准煤/平方米，共计节约标

准煤为 89.46 吨；既有建筑节能改造，其中包括 3000 万平方米居住建筑节能改造，3000 万平方米公共建筑节能改造，经计算，住宅建筑节能量为 7.7 千克标煤/平方米，公共建筑节能量为 9.9 千克标煤/平方米，共计节约标准煤量为 52.8 万吨。不同建筑改造措施具体节约标准煤的量如表 7-4 所示。

表 7-4 不同类型的可再生能源应用节约标准煤量

1	新建建筑节能	新建民用建筑 2 亿平方米，全面执行节能设计标准，并再次提高新建居住建筑节能设计标准	节约 193.12 万吨标准煤
2	拆除既有非节能建筑	拆除城镇非节能建筑 1000 万平方米，拆除农村非节能建筑 4000 万平方米，并重建为节能建筑	节约 89.46 万吨标准煤
3	既有建筑节能改造	3000 万平方米居住建筑节能改造，3000 万平方米公共建筑节能改造	节约 52.8 万吨标准煤

通过计算，提高节能建筑设计标准，未来五年内，新建建筑 2 亿平方米，PM_{2.5} 减排量为 3032t，拆除城镇非节能建筑 1000 万平方米，拆除农村非节能建筑 4000 万平方米，并重建为节能建筑，PM_{2.5} 减排量为 1395t，既有建筑节能改造，PM_{2.5} 减排量为 824t

第八章结论、控制对策及展望

8.1 结论

本课题主要探讨了采暖、炊事及建筑施工扬尘对大气环境中一次 $PM_{2.5}$ 的排放特性,通过对锅炉特征分布及农村周边采暖情况进行问卷调查,以及厨房炊事,建筑工地的实际测试,得出了三种不同的建筑因素对大气环境一次 $PM_{2.5}$ 排放总量,同时通过数值模拟探讨了三种建筑因素对大气环境的一次 $PM_{2.5}$ 分布特性。最后基于上述的研究结果确定采取一系列建筑相关的措施对大气环境一次 $PM_{2.5}$ 减量化的影响。通过以上研究得出三类具体结论:

一、不同建筑因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 一次来源总量贡献值

(1) 采暖因素(主要包括北京城六区和远郊十区的锅炉燃烧)对大气环境 $PM_{2.5}$ 总量贡献值为 $PM_{2.5}$ 约为 6063t,其中煤的总量贡献值为 5755t,天然气总量贡献值为 127t 和燃油贡献值为 181t。

(2) 北京周边农村地区采暖对大气环境的 $PM_{2.5}$ 总量贡献值为 2320t 左右。

(3) 通过对住宅厨房和商业厨房现场测试得出炊事产生的 $PM_{2.5}$ 总量与人口数量密切相关,北京地区每年由于炊事对大气环境中 $PM_{2.5}$ 总量贡献值约为 1751t。

(4) 通过对北京地区建筑工地现场测试,结合美国提出的 AP-42 模型估算,由于建筑施工扬尘产生的 $PM_{2.5}$ 对大气环境 $PM_{2.5}$ 总量贡献值为 1837.5 t。

北京市总面积为 16808 平方千米,其中市区面积为 750 平方千米,根据中国环境科学研究院大气所最新研究成果每天人为(去除背景值后) $PM_{2.5}$ 的贡献浓度值为 $50\mu g/m^3$,取计算高度 200 米,每年人为产生产生 $PM_{2.5}$ 总量 61350t。通过以上计算可得不同建筑因素对大气环境中贡献率约为 19.5%左右,不同因素的具体贡献值如下表所示:

表 8-1 不同建筑因素对北京地区大气环境一次 $PM_{2.5}$ 的贡献率

建筑因素	采暖	周边燃烧	炊事	建筑扬尘	建筑因素总计
$PM_{2.5}$ 贡献量(t)	6063	2320	1751	1837.15	11971.5
$PM_{2.5}$ 贡献率	9.88%	3.78%	2.86%	3.00%	19.52%

二、数值模拟得出了不同建筑因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 浓度分布情况

(1) 采暖因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布,与燃煤锅炉的数量分布

密切相关，远郊区县的 $PM_{2.5}$ 质量浓度高于城六区 $PM_{2.5}$ 质量浓度，采暖因素对大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响呈现非均匀分布，其质量云图呈现团簇状，区域化分布，最高 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $60\mu g/m^3$ 。

(2) 北京周边农村地区采暖对大气环境的 $PM_{2.5}$ 浓度分布，影响较为均匀，西北部的 $PM_{2.5}$ 质量浓度略高于其他区域，最高 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $40\mu g/m^3$ 。

(3) 炊事对大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响呈现非均匀分布，其中五环区域明显高于五环外，东城、西城、海淀、朝阳等区域高于其他行政区，最高 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $45\mu g/m^3$ ，其主要由于北京不同行政区域人口数量的不均匀分布所致。

(4) 建筑工地大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度影响呈现不均匀性分布，最高 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $35\mu g/m^3$ ，其中朝阳、海淀、房山及大兴等地 $PM_{2.5}$ 质量浓度较高，其主要由于这些行政区在施工建筑面积较大所致。

(5) 考虑京津冀等地 $PM_{2.5}$ 输运扩散作用，北京地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度显著升高，京津冀等地区协同控制、共同防治 $PM_{2.5}$ 具有重要意义。

三、定量评估相关措施对 $PM_{2.5}$ 减量化特征影响

(1) 定量计算节能标准提高对大气环境中 $PM_{2.5}$ 总量削减值为 1209t；降低供热温度 ($2^{\circ}C$) 对大气环境中 $PM_{2.5}$ 总量削减值为 608t；可再生能源使用对大气环境中 $PM_{2.5}$ 总量削减值为 888t；既有建筑节能改造对大气环境 $PM_{2.5}$ 总量削减值为 824t。

(2) 预测未来五年新建建筑 2 亿平方米，全面提升建筑节能标准， $PM_{2.5}$ 减排量为 3032t，拆除城镇非节能建筑 1000 万平米，拆除农村非节能建筑 4000 万平米，并重建为节能建筑， $PM_{2.5}$ 减排量为 1395t。

8.2 控制对策

基于本课题研究结果，提出以下关于 $PM_{2.5}$ 控制对策。

(1) 从本研究可以看出，采暖燃料的中煤对大气环境中 $PM_{2.5}$ 贡献率最大，因此减少远郊 10 区的燃煤锅炉数量，采用天然气等清洁能源，能够有效减少 $PM_{2.5}$ 的贡献量。

(2) 积极推进既有供热系统节能改造，解决供热系统跑冒滴漏等问题，提高供热管网输配效率，完整小规模锅炉的整合工作，从而减少供热能源的消耗，同时积极推进热计量改造，实行供热计量收费，同时采用多种锅炉节能技术，减少锅炉的能量的消耗，从减少能源的角度降低 $PM_{2.5}$ 排放总量。

(3) 加强北京周边农村地区供热燃料燃烧管理，尽量减少散煤燃烧，实施清洁能源替代，从而减低 $PM_{2.5}$ 排放总量。

(4) 调整烹饪习惯，采用内排式抽油烟机，使用无烟炊具，合理调整人口数量有利于降低炊事对大气环境中 $PM_{2.5}$ 排放总量。

(5) 加强施工现场管理，注意细节控制，尽量减少施工裸露面积及施工时间，及时对建筑施工现场进行封闭处理，能够有效的减少建筑扬尘对大气环境 $PM_{2.5}$ 的贡献率。

(6) 提高建筑节能标准、现有建筑节能改造、可再生能源新技术应用及降低室内环境供热温度均为削减大气环境中 $PM_{2.5}$ 质量浓度行之有效的措施。

第九章 致谢

值课题《北方集中供暖地区建筑因素对 PM_{2.5} 排放特性影响》报告完成之际，非常感谢美国能源基金会给予的大力支持，**感谢莫争春主任对此课题精心指导；感谢北京市市政市容管理委员会供热办提供相关供热、采暖的宝贵的数据，尤其感谢赫迎秋处长大力支持；**感谢北京市住建局提供关于建筑工地分布及施工工地面积的相关宝贵数据；感谢西安建筑科技大学在厨房及建筑工地产生的 PM_{2.5} 测试过程提供测试仪器；感谢张时聪、陈曦、袁闪闪、孙德宇及陈耀南等人在测试过程的帮助。

尤其感谢徐伟院长、邹瑜副院长及郎四维总工对本课题的精心指导及宝贵意见！

参考文献

- [1] 气候变化绿皮书：应对气候变化报告. 王伟光，郑国光. 社会科学文献出版社(M),2011:11-16.
- [2] Proceedings of the National Academy of Sciences, Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy; YuYuChen, Avraham, Ebenstein, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1300018110
- [3] Air pollution and cancer. IARC scientific publications. G Pershagen, Kurt Straif, Aaron Cohen, Jonathan Samet. <http://www.iarc.fr/en/publications/books/sp161/index.php>
- [4] 钟南山, <http://discovery.163.com/13/0115/10/8L8JSRT2000125LI.html>
- [5] Liu L, Zhang J. Ambient air pollution and children's lung function in China. *Environ Int.* (SCI IF 3.5) 2009, 35(1):178-86.
- [6] WANG Shunqin, ZHANG Jinliang. Blood lead levels in children, China. *Environmental Research.* 2006, 101: 412-418.
- [7] 彭应登; 张中华. 胡粼粼北京雾霾天形成的原因及特点浅析. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷) 2013, (1): 27-32.
- [8] Sun Y, Zhuang G, Tang A A, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 3148-3155.
- [9] Wu D, Tie X X, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China[J]. *Atmos Environ*, 2009, 43: 2375-2377.
- [10] 徐政, 李卫军, 于阳春, 王新锋, 周声圳, 王文兴. 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测[J]. *中国环境科学*. 2011(04): 546~552.
- [11] Huizheng Che, Xiaoye Zhang, Stephane Alfraro, Bernadette Chatenet, Laurent Gomes, Jianqi Zhao. Aerosol optical properties and its radiative forcing over Yulin, China in 2001 and 2002[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2009 (3):141-146.
- [12] Li, Z., Goloub, P., Dubovik, O., Blarel, L., Zhang, W., Podvin, T., ... & Buis, J. P. (2009). Improvements for ground-based remote sensing of atmospheric aerosol properties by additional polarimetric measurements. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(17), 1954-1961.
- [13] He, X., Li, C. C., Lau, A. K. H., Deng, Z. Z., Mao, J. T., Wang, M. H., & Liu, X. Y. (2009). An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban

area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(22), 8903-8915.

[14] Yip, F.Y., Keeler, G.J. et al. Personal exposure to particulate matter among children with asthma in Detroit, Michigan [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 5227-5236.

[15] Arden Pope III, Richard T. Burnett et al. Lung Cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air Pollution [J]. *The Journal of American Medical Association*, 2002, 287(9): 1132-1141.

[16] Yang C, Peng X, Huang W, et al. A time-stratified case-crossover study of fine particulate matter air pollution and mortality in Guangzhou, China[J]. *International archives of occupational and environmental health*, 2012, 85(5): 579-585.

[17] Guo, Y., Jia, Y., Pan, X., Liu, L., & Wichmann, H. (2009). The association between fine particulate air pollution and hospital emergency room visits for cardiovascular diseases in Beijing, China. *Science of the total environment*, 407(17), 4826-4830.

[18] 王德庆, 王宝庆, 白志鹏. $PM_{2.5}$ 污染与居民每日死亡率关系的 Meta 分析. *环境与健康杂志*, 2012: (6) 27-32

[19] 张庆丰, 迈向环境可持续的未来中华人民共和国国家环境分析 (M), 中国财政经济出版社.2012.12

[20] 杨天智. 长沙市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及来源解析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[21] 吕森林, 汪安璞, 焦正等. 大气颗粒物源解析研究方法比较与进展[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005:1393-1397.

[22] 宋宇, 唐孝炎, 方晨. 北京市大气细粒子的来源分析[J]. *环境科学*, 2002, 23 (6): 11-16

[23] 朱先磊, 张远航, 曾立民等. 北京市大气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的来源研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 18 (5): 1-5.

[24] Yang Yongjie, Wang Yuesi, Huang Weiwei, HU Bo, WEN Tianxue, ZHAO Yanan. Size distributions and elemental compositions of particulate matter on clear, hazy and foggy days in Beijing, China. *advance of atmospheric science*, 2010, 27(3): 663-675.

[25] Zhang R., Jing J., Tao J., Hsu S.-C., Wang G., Cao J., Lee C. S. L., Zhu L., Chen Z., and Zhao Y. Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective *Atmos. Chem. Phys.*: Otc. 2013, 13, 9953–9974

[26] Ling Yu, Guangfu Wang et al. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in an urban environment in Beijing. *Aerosol Air Quality Res*, 2013, 13:574-583

[27] USA/ECE (2002) Draft Guidelines for Estimating and Reporting Emissions EB. AIR/ GE. 1 /2002/7, UN/ECE, Geneva, Switzerland, 2 July, 2002.

[28] EPA (Environmental Protection Agency) (2000) Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, 5-th ed., Chapter Metallurgical Industry, Section 12.2 Coke Production. Section updated in September 2000, downloaded from the EPA web site. United States Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, North Carolina, U.S.

[29] Moisio, M. (1999) .Real time size distribution measurements of combustion aerosols. Publication 279, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

[30] Ganley, J.T. and Springer, G.S. (2002) Physical and chemical characteristics of particulates in spark ignition engine exhaust. *Environmental Science and Technology*, 8, pp. 340-347.

[31] Lükewille A, Bertok I, Amann M, Cofala J, Györfas F, Heyes Ch, Karvosenoja N, Klimont Z and Schöpp W (2001) A framework to estimate the potential and costs for the control of fine particulate emissions in Europe. Interim Report IR-01-023, IIASA, Laxenburg, Austria, 119-121.

[32] Berdowski, J.J.M., Mulder, W., Veldt, C., Visschedijk, A.J.H., and Zandveld, P.Y.J. (1997): Particulate matter emissions (PM_{10} - $PM_{2.5}$ - $PM_{0.1}$) in Europe in 1990 and 1993. TNO-report, TNO_MEP - R 96/472.

[33] APEG (The Airborne Particle Expert Group) (1999) Source apportionment of airborne particulate matter in the United Kingdom. Prepared on behalf of the Department of the Environment, Transport and the Regions, the Welsh Office, the Scottish Office and the Department of the Environment (Northern Ireland).

[34] 刘宗江, 以更高节能目标为导向的公共建筑能效性能研究, 中国建筑科学研究院, 硕士论文.

[35] 杨玉兰, 李百战, 姚润明. 居住建筑能效评价指标及权重的确定[J]. 暖通空调. 2009(05):48-52.

[36] 程立刚, 王艳姣, 王耀庭. 遥感技术(ARCGIS)在大气环境监测中的应用综述[J]. 中国环境监测. 2005(05):187-190.

[37] 刘霞, 葛新锋. FLUENT 软件及其在我国的应用[J]. 能源研究与利用. 2003(02):36-38.

[38] 罗昔联, 顾兆林. 基于 DPM 模型的街谷内颗粒物扩散特性研究. 中国科

学院研究生院学报, 2007 (5) 578-583.

[39] 北京市住房和城乡建设委. 北京市“十二五”时期民用建筑节能规划,2011.

[40] 田谥. 京津冀地区霾污染过程大气 $PM_{2.5}$ 及前体物变化特征研究,北京化工大学硕士学位论文 (2013)

[41]黄丽坤, 王广智等. 哈尔滨市采暖与非采暖期大气颗粒物污染特性研究. 环境工程学报,2011(1)

[42] 李凯,张承中等. 西安市采暖期 $PM_{2.5}$ 污染状况及其与气象因子的相关分析.安徽农业科学, 2009 (20) .

[43] 姚青,张长春等. 采暖对天津近地层 $PM_{2.5}$ 污染特征的影响. 生态环境,2008(4).

[44] 高建卫, 朱能, 叶建东等. 北京农村地区居住建筑的适用节能措施分析. 天津大学学报, 2009 (5).

[45] 中华人民共和国统计局.<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>

[46] 高明侠.高层住宅厨房公共排烟道不均匀开启率对烟道内烟气流动的影响[D] 硕士学位论文.西安建筑科技大学, 2012.

[47] 吴禹等.可吸入颗粒物对呼吸道的致炎作用[D]硕士学位论文.重庆医科大学, 硕士学位论文, 2005.

[48] 王凯雄,朱杏冬.烹调油烟气的成分及其分析方法[J].上海环境科学,1999,18 (11): 526-528.

[49] Che-Ming Chiang, Chi-Ming Lai, Po-Cheng Chou, et al. The Influence of An Architectural Design Alternative (transoms) on Indoor Air Environment in Conventional Kitchens in Taiwan[J]. Building and Environment, 2000 (35): 579-585.

[50] M.Pinto, J. Viegas, V.P. de Freitas. Air Permeability Measurements of Dwellings and Building Components in Portugal[J]. Building and Environment,2011;46: 2480-2489.

[51] 谷超等.厨房污染物扩散规律研究与动态模拟软件开发[D].沈阳:沈阳建筑大学,2011: 1-10.

[52] M. Amouei Torkmahalleh, Y.Zhao, P.K. Hopke, A. Rossner, A.R. Ferro.Additive impacts on particle emissions from heating low emitting cooking oils[J]. Atmospheric Environment, 2013;74:194-198.

[53] Shun Cheng Lee, Wai-Ming Li, Lo Yin Chan. Indoor air quality at restaurants with different styles of cooking in metropolitan Hong Kong [J]. The Science of the Total Environment, 2001;279:181-193.

[54] Jun Gao. Volume-based size distribution of accumulation and coarse

particles (PM_{0.1-10}) from cooking fume during oil heating [J]. *Building and Environment*, 2013, 59:575-580.

[55] 张健. 建筑施工环境因素分析及污染防治[J]. *低温建筑技术*. 2007 (05): 132-134.

[56] 钱孝琳, 阚海东, 宋伟民, 陈秉衡. 大气细颗粒物污染与居民每日死亡关系的 Meta 分析[J]. *环境与健康杂志*. 2005(04): 246-248.

[57] 徐向峰. 施工阶段环境污染问题分析与防治措施[J]. *河北建筑工程学院学报*. 2007(03): 25-27.

[58] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁等. 兰州市建筑扬尘重金属污染评价及健康风险评价[J]. *环境科学*. 2014(03): 1021-1028.

[59] 魏金枝, 朱振岗, 王贤珍, 郭殿林. 道路建筑扬尘毒性研究[J]. *环境与健康杂志*. 2002(04): 325-327.

[60] 任慧敏, 王金达, 张学林. 沈阳市建筑扬尘的空间分布及风险评价研究[J]. *地球科学进展*. 2004:171-176.

[61] 赵秀勇, 程水源等. 北京市施工扬尘污染与控制[J]. *北京工业大学学报*, 2007 (10) :125-126.

[62] 王 铮, 华 蕾等. 北京市无组织排放源颗粒物的粒度分布[J]. *中国环境监测*, 2007 (23):56-59.

[63] 田刚, 李钢等. 施工扬尘空间扩散规律研究[J]. *环境科学* [J], 2008 (1) :29-36.

[64] 温玲丽, 尘世建筑施工扬尘空间运移模式的数值模拟[D], 兰州大学硕士论文, 2008

[65] 张智慧, 吴凡. 建筑施工扬尘污染健康损害的评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*. 2008(06):922-925.

[66] 赵普生、冯银厂等. 建筑施工扬尘特征与监控指标[J]. *环境科学学报*, 2009(8):132-138.

[67] 王帅杰, 朱坦, 洪刚等. 石家庄市地面起尘量估算方法[J]. *城市环境与城市生态*, 2003(12):142-148.

[68] 黄嫣旻. 地面扬尘的估算与分布特征研究, 城市地面扬尘的估算与分布特征研究[D], 2006.

[69] K.F. Ho et al. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for fugitive dust in Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 1752-59.

[70] X. Quero et al. Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in Spain[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 1895-1902.

[71]孙娟, 束炯, 鲁小琴.上海市扬尘污染源遥感解译及其管理信息系统.上海环境科学, 2003, 22(5):56-59.

[72]国家环境保护局.《防治城市扬尘污染技术规范》, 2007,11.(34):1-11.

[73]翟绍岩.上海市道路、建筑工地扬尘(PM10)排放估算方法研究[D].2008.5, 硕士学位论文.

[74] 王英; 金军等. 北京城建扬尘解析. 中央民族大学学报.2007 (11):14-21.

[75] U.S. Environmental Protection Agency. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD[R]. Publication No. EPA-454/B-03-001. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, September 2004.

[76] U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711; Comparison of Regulatory Design Concentrations AERMOD: Versus ISCST3 and CTDMPLUS[R], April 1999.

[77] 翟绍岩,赵敏,徐永清等.AERMOD 模型原理及应用[J].中国科技论文在线, 2007 (3):1-7.