

内蒙古师范大学

硕士学位论文

呼和浩特市大气降尘及源分析

姓名：刘广通

申请学位级别：硕士

专业：自然地理学

指导教师：海春兴

20080415

中 文 摘 要

我国北方干旱半干旱地区生态脆弱, 土质疏松, 大风天气条件下极易发生沙尘天气, 使空气环境质量下降。内蒙古自治区呼和浩特市即处在这一沙尘暴易发区。

本论文以呼和浩特市为主研究区。2005 年到 2006 年在内蒙古师范大学、内蒙古师范大学和林盛乐校区布点用玻璃球法和湿法采集降尘样品, 用大平铲定点采集阴山北麓表土样品、蒙古国表土样品, 用毛刷扫取呼和浩特市道路尘样品、呼和浩特市煤烟尘样品、呼和浩特市建筑尘样品, 对样品做了机械组成、比表面、电镜扫描及化学元素组成等理化实验。

对实验数据采用对比分析法、判别函数分析法、富集系数法等方法进行了分析比较, 得出: 呼和浩特市大气降尘集中在春季, 尤其以大风降尘量为最大; 呼和浩特市尘暴降尘物的粒径范围大, 且受发生具体条件的影响, 降尘粒度分布稳定性差; 降尘有较大的比表面, 湿法收集条件下, 比表面平均值为 $5.65\text{m}^2/\text{g}$, 玻璃球法收集条件下, 比表面平均值为 $2.60\text{m}^2/\text{g}$; 电镜扫描图显示, 湿法收集降尘的颗粒较小, 粒径过渡均匀, 玻璃球法收集的降尘颗粒较大, 粒径差别较大, 湿法接收的降尘中大颗粒所占的比例小于玻璃球法接收降尘中大颗粒所占的比例; SiO_2 是各个降尘样的最主要成分, 其质量百分含量在 50%左右, 其次 Al_2O_3 的含量最多, 质量百分含量在 11%-14%之间, CaO 与 Fe_2O_3 的含量相差不大, 其质量百分含量约为 5%-7%, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 这三种成分为降尘的最主要成分; 呼和浩特沙尘暴降尘与非尘暴降尘化学成分质量百分含量个别

成分相似，整体相差较大；阴山北麓表土与呼和浩特大气降尘的关联性很好。整体而言，呼和浩特市大气降尘尘源物质还是以附近的阴山北麓表土及市区道路尘为主，在主尘源物质传输过程中加合了输移路径上的其他一些飞扬物。

通过上述研究，基本摸清了呼和浩特市春夏期间大气降尘的性质及主要来源，为市区大气环境质量改善提供科学依据。

本文中市区道路尘又是一种兼有交通尘、煤烟尘、建筑尘及其它各种来源尘土的混合物，受实际取样条件限制，未能将道路尘的成分详细区分，但从已有实验结果可以得出其对交通尘的代表性较高。受样本数量限制，未能用因子分析法进行呼和浩特大气降尘源解析，对于降尘与蒙古国表土关系的分析也显得很是粗略，实为论文中的缺憾之处。

关键词：呼和浩特，大气降尘，源分析

ABSTRACT

Ecological environment is fragile in arid and semi-arid areas of north China, where the soil is loose. So it is easy to have dust weather in the condition of windy weather and make the quality of air environment declining. Hohhot in the autonomous region of Inner Mongolia is located at the easy regions of happening sandstorm.

The study area is mainly Hohhot in this paper. Set sampling points by the way of glass ball and wet and collect dust samples during 2005-2006 in Inner Mongolia Normal University and the Shengle campus in Helin county. Surface soil samples were collected by the Pacific shovel in the north foot of Yinshan Mountain and Mongolian. Road dust samples, coal dust samples and building dust samples were swept by brush in Hohhot. Mechanical composition, specific surface area, scanning electron microscopy and chemical elements and other physical and chemical experiments were did using the samples.

The experimental data were analyzed and compared by the methods of using comparison analysis, discriminant function analysis, enrichment coefficient and so on. It shows that atmospheric dust fall concentrates in the spring in Hohhot, particularly in the windy weather; diameter range of dust fall particle in sand storm days is big in Hohhot and it is in the impact of the specific conditions, the stability of granularity distribution of dust fall is infirm; Dust fall has greater specific surface area, the average specific surface area is $5.65 \text{ m}^2/\text{g}$ in the condition of wet collection and $2.60 \text{ m}^2/\text{g}$ in the condition of glass ball collection; scanning electron microscope displays that the size of dust fall particles in wet collection is smaller with uniform granularity transition and the size of dust fall particles in glass ball collection is larger with big difference of granularity, and the proportion of big particles

in dust fall with wet collection is smaller than that with glass ball collection.

SiO_2 is the most important composition in all dust fall and its percentage is about 50% in quality, followed by the content of Al_2O_3 , between 11% -14% in quality. The difference between the content of CaO and Fe_2O_3 is little and its percentage is about 5% -7% in quality. SiO_2 and Al_2O_3 , Fe_2O_3 are the most important components in dust fall. In Hohhot individual components of dust fall in sand storm days are similar to dust fall in non sand storms days as for the chemical composition on the percentage of quality, but the overall difference is big. The relevance is good between the surface soil in the north foot of Yinshan Mountain and the dust fall in Hohhot. Overall, the source of dust fall in urban district of Hohhot is mainly surface soil in the north foot of Yinshan Mountain nearby and road dust in urban areas. The main source of dust fall added other rising substance on the transport path in the process of transmission.

Through this research, the quality of dust fall and its main sources have been made clear during the spring and summer in Hohhot basically. And provide a scientific basis for the improvement of the quality of the atmospheric environment in urban.

Road dust in urban is a combination of traffic dust, coal soot dust, construction dust and other mixture of a variety of sources. Due to the condition of actual sampling constraints, the composition of road dust may not be able to distinct in detail, but it can show that the representation of traffic dust is high from the having result of experiment. Because of quantitative restrictions of samples, source analysis of dust fall in Hohhot is unable to use the method of factor analysis and the relations between dust fall and surface soil in Mongolia was analyzed rough. It is truly the deficiency of the thesis.

Key words: Hohhot, atmospheric dust fall, source analysis

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果，尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人为获得内蒙古师范大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示感谢。

签名：刘广通

日期：2008年6月20日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解内蒙古师范大学有关保留、使用学位论文的规定：内蒙古师范大学有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文，并且本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

签名：刘广通

导师签名：

刘广通

日期：2008年6月20日

1. 综述

1.1 引言

工业社会以来,环境问题随着社会生产的不协调发展而日显突出,也随着人类对环境质量要求不断提高,环境问题的解决日益迫切。环境问题包含的内容相当广泛,大气环境问题也属其中之一。

大气环境因其环境介质具有流动性,使得大气环境具有一些特殊性,那就是除了具有地区性特征之外,还具有较强的区间联系性。因此,研究一个地区的大气环境,就不得不将这二者皆顾。

呼和浩特市地处阴山南麓,年降水量 335.2—534.6mm 间,干湿地区划分中属于旱半干旱地区,处于典型草原向荒漠草原过渡区,沙尘天气多发是该区大气环境的一个重要特征。作为内蒙古自治区的首府城市,该地区具有较强烈的人类活动,对该区的大气环境产生强烈影响。自然因素与人为因素的综合作用使得该区大气环境具有综合复杂的特征。从地区联系方面看,该区大气环流属于东亚季风环流区,其冬季风(西北风)及夏季风(东南风)上风向地区的物质在大气环流的作用下皆可影响该区,并与该区发生物质交换,当然,也存在“地—气”系统间的物质交换。在小尺度规模上的“热岛效应”及“山谷风”也会使呼和浩特市市区与周边地区发生物质迁移与交换。

近几年,随着国家社会经济的发展及西部大开发战略的实施,呼和浩特城市发展迅速,伴随出现的环境问题包括大气环境问题在内也日渐明显。要实现人与环境的和谐发展,就要对出现的环境问题加以深入研究,从而达到最终解决问题的目的。

关于呼和浩特市市区大气环境问题的研究资料比较丰富^[1-6],在前人的研究中也各有侧重。本论文以呼和浩特市市区大气环境所具有的颗粒物含量大这一明显特征为研究出发点,选取大气降尘为研究对象,通过对大气降尘理化性质研究及其来源探讨,以期对呼和浩特市市区大气环境质量改善有所裨益,对同类地区大气环境研究及质量改善提供参考。

1.2 大气颗粒物研究进展

大气降尘由粒径不同的大气颗粒物组成。大气颗粒物(Airborne Particulate Matter, APM)即 TSP(Total Suspended Particles),是由粒径为 0.05-100 μm 不等的颗粒物组成,依据粒径大小又细分为 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$ 及 $\text{PM}_{0.1}$ 。TSP 在大气中的含量及其组成与人类生产生活关系非常密切,它不仅会沉积在人的呼吸系统危害人体健康,还是光化学反应的催化剂,且对云核的形成、对太阳光及红外线的吸收、散射及气候变化等都产生影响。因此, TSP 不仅直接影响人们的生活质量,而且还是地球气

候变暖、酸雨形成等重大环境问题产生的重要根源之一。

研究大气中 TSP 的来源,掌握其在大气中迁移、转化行为,解析 TSP 的结构、浓度及化学组成,分析其对生活环境、气候变化带来的影响,对更好地从源头上控制城市 TSP 污染有大的意义,从而达到城市大气颗粒物污染控制和管理的目的。大气颗粒物排放源主要可分为四类^[7]:

I. 天然源,只受到自然力而非人力作用排放颗粒物的源类,主要包括海盐粒子、风沙土壤、火山灰和植物花粉;

II. 人为源,只受到人力作用而非自然力作用排放颗粒物的源类,主要包括燃煤飞灰、燃油飞灰、工业粉尘和生物尘;

III. 混合源,既受到人力作用又受到自然力作用排放颗粒物的源类,主要为扬尘。

IV. 其他源。

大气颗粒物的来源和形成过程、在大气中的迁移转化、输送和清除过程及其物理化学性质均与其粒径有着直接的关系。大气颗粒物的粒径一般为 $0.002\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$, $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上的粒子在发生源附近发生沉降,只有很小的粒子沉降速度较慢,长期在大气中滞留。大气颗粒物通常呈三模态分布,即粒径小于 $0.08\text{ }\mu\text{m}$ 的爱根(Aitken)核模态、粒径 $0.08\text{ }\mu\text{m}\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ 的积聚模态(Accumulation mode)和粒径大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的粗粒子模态(Coarseparticlemode)。粗粒子模态的颗粒物主要是由工业源与生活源燃烧排放、机械粉碎过程和交通运输等产生的一次颗粒物和各种自然界产生的颗粒物组成。这部分颗粒物是构成大气气溶胶的体积浓度和质量浓度的主体,由于重力沉降作用大而在大气中存在的时间不长,只有在特殊的气象条件才能长距离输送。爱根核模态颗粒物也称为超细颗粒物(Super fine particles),主要是由污染气体经过复杂的大气化学反应转化而成,或者由高温下排放的过饱和气态物质冷凝而成,也有少量来自于自然界和人为源直接排放。超细颗粒物是大气中最不稳定的颗粒物,在产生后很快与较大的颗粒物凝并或者成为云或雾滴的凝结核,其存在寿命通常不超过 1 小时。积聚模态颗粒物主要是由爱根核模态颗粒物通过碰并、凝聚、吸附等物理效应长大而成,也可由挥发性组分凝结或通过气粒转化而成,此外还有一部分来自于细小的地面尘。这部分颗粒物在大气中最为稳定,因而存在时间最长,输送距离最远,污染范围最广。元素组成也因粒径不同差异较大,粗大的颗粒物与土壤组成相近,以 Si、Al、Fe、Ca、Mg 等为主要成分。由于粗大粒子质量较大容易沉降,在大气中滞留时间较短,一般是几分钟至几天,而微小粒子在大气中一般可滞留几天至几周,因此可长距离输送,一般影响范围可达几百至几千千米^[8]。

污染物质的分布具有地区性,不同地区的主要污染物质不同。其中大气颗粒物即TSP的影响非常普遍。1999年—2002年的国家环境质量公告中均指出总悬浮颗粒物为我国各城市空气污染的主要污染因子。1999年,统计的338个城市中,60.0%的城市TSP浓度年均值超过国家二级标准。2000年,统计的338个城市中,总悬浮颗粒物(TSP)或可吸入颗粒物(PM₁₀)年均值超过国家二级标准限值的城市占统计城市的61.6%。2001年,统计的341个城市中,64.1%的城市颗粒物年均浓度超过国家空气质量二级标准。其中101个城市颗粒物年均浓度超过三级标准,占统计城市数的29.2%。颗粒物浓度高的城市主要分布在新疆、青海、甘肃、山西、内蒙古、陕西、宁夏、河北等省区。2002年,统计的343个城市中,63.2%的城市颗粒物浓度超过国家空气质量二级标准。北方城市颗粒物污染总体上重于南方城市,颗粒物污染较重的城市主要分布在华北、西北、东北和中原及四川东部、重庆市。据国家环保总局污控司大气处2004年2月统计,在全国监测统计的343个城市中,60.0%城市颗粒物PM₁₀浓度超标。包括北京、上海等113个重点城市中,64.6%的城市超标。其中37.7%的城市超过三级标准。有308个城市总悬浮物平均浓度高于世界卫生组织的空气质量指南值(0.09 mg/m³),占统计城市的95.7%。颗粒物污染是当前我国城市空气污染的首要因素。北方城市颗粒物污染总体上重于南方城市,颗粒物污染较重的城市主要分布在西北、华北地区,山西、陕西、河南、河北、宁夏、甘肃、新疆、内蒙古等省区的颗粒物污染比较突出^[9]。我国北方干旱半干旱地区浮尘与沙尘暴天气发生频繁,TSP污染物中强风吹起的沙尘占相当大的比重。城市化过程中,随着人口规模及城市用地规模的扩展,促进了城市TSP的产生。首先从TSP的产生源来看,我国北方干旱半干旱地区降尘贡献量最大的是沙尘暴,且在季节分配上集中在春季,工业尘、交通尘及建筑尘等的排放则经常性地作用于城市大气。城市由于建筑群的影响,市区内空气流动不畅,不利于污染物的扩散,这也是加重城市大气TSP含量的一个重要原因。

沙尘暴的发生会使空气中颗粒物含量大大增加。沙尘暴发生的条件有:大风;疏松裸露的沙土质表层;不稳定的大气层结^[10]。在中国,由于人类活动强度加大后对生态环境的破坏^[11]和气候变化导致的荒漠化过程^[12]加剧了一部分地区发生扬沙和沙尘暴天气的可能性^[13]。土壤风蚀是我国北方地区生态环境破坏的主要表现之一。土壤风蚀过程与地表环境特征或下垫面条件有着密切的关系。地表环境特征主要包括植被特征(如植被类型、种类组成、盖度、冠层高度和地上生物量等)、土壤特征(包括土壤类型、质地、机械组成、容重、有机质含量、地表紧实度和土壤含水量等)和近地面风速特征,关于这方面的研究,国外文献已有详尽的描述^[14-18]。在发生风蚀的要素

中,植被特征和土壤性质主要影响近地面风蚀速率^[19]。因此,土壤风蚀过程与地表环境特征关系的研究,一直是国际地理学和生态学科学工作者所关注的热点问题^[20-21]。近年来,为了阐明土壤风蚀过程与地表环境特征之间的复杂关系,以确定各个地表环境特征因子在土壤风蚀过程中的作用,国内外学者进行了大量的实验研究,提出了反映地表特征与近地面风相互作用关系的参数,其中使用最广泛的一个参数是地面粗糙度长度(surface roughness length)或空气动力学粗糙度长度(Aerodynamic roughness length)等^[22-23]。在野外,地面粗糙度长度与土地利用类型及耕作方式关系密切。干旱半干旱区发展农业生产对土壤风蚀产生很大的影响,不同的土地利用方式、利用强度,对表土的破坏程度不同,对风蚀起沙的贡献影响很大。不同土地利用下表土有不同物质组成及不同的抗风蚀强度,这直接决定着起沙物质组成及起沙量。

内蒙古中西部属中国主要的沙尘暴多发区^[24-25],1957—1996年40年间,内蒙古中西部共发生各种范围的强和特强沙尘暴184次,平均每年4.6次^[24]。受蒙古高压、干旱少雨和人类活动的影响,内蒙古中西部每年春季都会发生多次沙尘天气。沙尘暴是一种危害极大的灾害性天气,它的发生发展既是一种加速土地荒漠化的重要过程,又是土地荒漠化发展到一定程度的具体表现^[26]。国外从20世纪20年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究,国内20世纪70年代开始对沙尘暴天气进行研究^[27]。从20世纪80年代起,从沙尘物质成分的角度去分析沙尘暴的源地、输送量和沉降机制日渐成为沙尘暴研究重点^[28],浮尘是由大气天气尺度范围运动所引起的大范围黄沙天气现象之一,在我国有关浮尘的记载古已有之,如史书中的“黄砂”、“雨土”、“黄雾四塞”、“沙尘涨天”等记载即指浮尘天气。浮尘是指尘土、细沙均匀地飘浮在空中,水平能见度小于10km的天气现象,是降尘时必有的现象。^[29]浮尘天气的发生必然增大地表降尘量。浮尘作为地气系统间的固体微粒循环,为研究与之联系的区域和全球尺度的大气运动提供了良好的对象。浮尘具有飘洋过海的能力。亚洲沙尘暴主要源自于中国西北和北方、蒙古国南方、俄罗斯东方的干旱及半干旱地区,并好发于每年1—5月之冬季至春末期间,会随着盛行西风向东传输至朝鲜半岛及日本,甚至跨越北太平洋而传送至北美大陆。^[30]

沙尘天气直接影响着人类的生存环境,危害极大。扬沙和沙尘暴对土壤有极强的破坏作用^[29, 31],会引起起沙区表层土壤组成物质的大量损失,也会导致部分沙尘覆盖区土壤品质的下降。沙尘暴的发生对下风向地区的空气污染影响很大^[32-33]。强沙尘暴影响无线电波的传播^[34],由于沙尘暴携带大量的颗粒物,使发生沙尘暴地区的大气气溶胶中可吸入颗粒物浓度急剧增加,其带来的健康危害不容忽视^[35]。浮尘天气可对人

类的身心健康产生不良影响,如过敏、眼涩、鼻痒、胸闷、气短、头痛脑胀、心理恐慌等^[36, 37, 44]。据美国有关部门统计,美国每年因空气中细微颗粒物影响而过早死亡的老年人数以万计,儿童由于呼吸系统处于发育阶段,更容易受到细微颗粒物的伤害^[38]。国外研究表明,一些金属的致癌能力依次为:As>Cr> Ni>Ba>Pb >Cd; As 和 Cd 对人体有潜在致畸作用(王平利等,2005)。由黄沙天气过程所引发的气候学效应,如对大气能见度、大气光学特性、地气辐射平衡的影响及导致自然生态环境的破坏等已是不可忽视的大气和生态环境问题之一,因此长期以来为国内外学者所关注,并做了大量工作^[39]。浮尘能污染空气、水源、农作物及一切地面设施,影响能见度、缩短光照时间、降低光照强度、光照质量^[40-41]。浮尘对农作物有很大危害,特别是春季棉花苗期、玉米真叶期,作物幼芽上覆盖厚厚的降尘,影响植物的呼吸作用和光合作用^[41]。浓重的浮尘可使牲畜患病甚至窒息死亡;造成交通中断,是农牧业生产中的灾害性天气^[42]。日本有的研究人员还指出弱“kosa”对土壤微粒的地球化学循环作用的重要性^[43]。浮尘还能稀释大气中的有害元素浓度,在这一点上,对清洁大气环境也起到一定的作用^[44]。来自中国的黄沙到达日本后作为冰晶核的主要部分,对形成降水起着重要作用^[45],同时黄沙冰晶核带碱性,对防止日本酸雨的产生起着积极的中和作用^[46]。但整体而言,沙尘暴产生的危害是其影响的主要方面。探清降尘来源对于改善环境,防治起尘,减轻沙尘危害有非常重要的意义。

尘暴降尘往往是沙尘暴影响区降尘的主要来源,多发的沙尘暴给下风向受尘区大大增加了大气 TSP 含量及降尘量。沙尘天气出现的有利气象条件是冷锋推进时前方暖气团干燥而无降水,另外与地表沙尘的厚度以及冷空气入侵路径等有关。尘暴降尘具有快速降尘现象,由于搬运介质强度、搬运距离和沙尘暴源区及途经区特征的差异,同一地点尘暴降尘与非尘暴降尘沉积特征不同^[47],不同地点的降尘沉积特征也不相同,也有不同的物质组成,这对不同区域间降尘对比分析及探清降尘来源有很大帮助。

学者们对沙尘暴的成因、过程、趋势及防治对策做了大力研究^[48],对其发生的源区、迁移路径^[49]以及粉尘气溶胶成分特征等也有进一步认识^[50]。碳元素是大气气溶胶的重要组成部分,气溶胶中的含碳物质分为有机碳(Organic Carbon, 简称 OC)和无机碳(Elemental Carbon, 简称 EC),有学者通过 OC、EC 及二者间的关系对大气气溶胶进行相关研究^[51-54]。对大气降尘的研究过程中,研究方向与采用的方法及研究区域也不尽相同。李德成应用 ICP MS 测定了从 1998 年 10 月至 1999 年 9 月共 12 个月的北京西北郊降尘中稀土元素的浓度,同时测定了从 1999 年 4 月至 6 月间 8 次降雨中的稀土元素的浓度。对降尘和降雨中稀土元素的分布模式进行了初步分析^[55]。张宁在

对降尘沉积物的粒度分析时使用 Sedigraph 5100 粒度分析仪(美国 Micromeritics 公司生产), 进行 X 射线吸收—沉降法测定^[56]。端木和顺为探讨颗粒分布与其物源和化学性质的关系, 对部分样品作了重金属元素分析, 电镜观察以及 SO_2 含量与全硫同位素分析^[57]。肖洪浪为了便于在土壤、结皮和尘样之间对比, 使用吸管法分析粒度组成, 同时一些尘样在不加任何分散剂下使用英国 Malvern Instruments Ltd. 生产的 Master SMAM 5004 激光粒度分析仪进行分析; 不做任何预处理的尘样使用日本制造 X 射线光谱仪, 带 GB W071-4 系列标样测定元素成分; 重矿物使用三溴甲烷分离, 并在偏光显微镜下鉴别矿物类型^[58]。陈天虎在分析合肥市大气降尘时使用配有 ISISX 射线能量色散光谱(EDS)的 JEOL-2010 型高分辨透射电子显微镜(HRTEM)得到 TEM 图像, EDS 分析使用标样^[59]。林国珍等为了研究各个地区大气降尘中水溶性有机物的组成与含量, 从离地表 20 米处的电网绝缘子表面采集九个大气降尘样品, 对其水溶性部分用有机溶剂进行有机物的分离萃取, 求出有机物的含量, 采用 XRPD 进行物相鉴定, 确定有机物的组成可分为有机酸、有机酸钾盐、有机碱盐酸盐加合物, 尿素与尿素硝酸盐加合物等四类, 并对其影响 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的溶解度进行一系列实验^[60]。陈天虎运用 X 射线粉末衍射、红外吸收光谱、扫描电镜分析等手段对合肥市大气颗粒物进行了分析研究, 结果显示合肥市各个取样点大气颗粒物组成基本稳定^[61]。蔡若松在研究丹东市大气降尘时, 提出了网络布点, 实测采样, 用积分法来求取大气降尘值^[62]。

大气降尘源解析工作开展速度较快。为了控制和削减大气中总悬浮颗粒物的含量, 提高空气质量, 对总悬浮颗粒物进行防治就必须了解大气中颗粒物的来源, 包括定性识别大气颗粒物的来源, 定量地计算出各个源对环境污染的贡献值(分担率), 这就是源解析(Source Apportionment)技术。源解析技术研究方法的数学模型主要可分为以污染源为对象的扩散模型(Diffusion model)和以污染区域为对象的受体模型(Receptor model)。扩散模型研究及应用已比较成熟。受体模型在现阶段的源解析工作中得到不断的推广应用, 它采用在排放源和受体采样点测量的气态物质或颗粒物的物理、化学特征来判别受体的来源并定量判别源的贡献。与扩散模型相比, 受体模型不用考虑传输、扩散、沉降等气象过程和复杂的中间化学过程, 一般通过源排放和受体浓度的化学特征分析来推断各种源的浓度贡献率。应用的解析方法目前也相当丰富, 有显微法(主要包括光学显微法 OM、扫描电子显微镜法 SEM、计算机控制扫描电镜法 CCSEM)、物理法(主要包括 X-射线衍射线 XRD 和轨线分析法 trajectory analysis)、化学—统计学方法(主要包括化学质量平衡法 CMB、因子分析法 Factor Analysis, FA、多元线性回归 Multivariate Linear Regression, MLR、富集因子分

析法 Enrichment Factor, EF)、区域尺度模型 (Iterative、Divisive、Nonweighting、Nonoverlapping、IDNN)、粗集理论 (Rough Sets, RS)、投影寻踪回归法 (Projection Pursuit Regression, PPR)、基于遗传算法 (Genetic Algorithms, GA)、正交矩阵因子分解法 (Positive Matrix Factorization, PMF)、混合方法等。目前经常应用的受体模型是因子分析法和化学质量平衡法。美国、日本等国家从 20 世纪 70 年代起, Miller 和 Friedlander 等人开始由排放源转移到受体, 进行大气颗粒物的源解析, 因子分析法是多元统计法的一种, 它是布利福德 (Blifford) 等人在气溶胶研究中首先提出来的^[63]; 1981 年美国环保局将化学质量平衡 (CMB, Chemical Mass Balance) 模式作为评估大气质量的标准方法; 1987 年美国环保局将受体模型的计算程序规范化, 并推荐使用, 取得了较好的结果^[64]。它现已作为一种重要的手段, 应用于城区、区域至全球的大气环境研究^[65]。我国一些城市都在进行城市大气降尘源解析工作, 应用的解析方法也由定性解释向定量解析方向发展并逐步趋于完善。如北京^[66]、上海^[67]、常州^[68]、重庆^[69]、乌鲁木齐^[70]、青岛^[71-72]等地区均有学者应用 CMB 法进行了大气颗粒物源解析, 取得了比较好的结果。陈发虎等分析定期收集的兰州市降尘样品时, 用 X 射线荧光法分析了其中 24 种元素的相对浓度, 并用富集因子法对数据进行了处理、分析^[73]。客绍英等用中子活化分析法分析了唐山市区 12 月份大气降尘中元素及水平, 结果表明降尘中元素主要来自于地壳和扬尘, 市区污染程度较低^[74]。殷汉琴 (2005 年) 通过对铜陵市大气降尘重金属元素的分析做了铜陵市降尘的详细源解析。进行源解析工作关键是要选择合适的标识元素及标识元素的数量要足够, 实践表明, 选取十个以上元素可保证相关系数在 0.9 以上^[75-77], 标识元素一般根据各种源排放的特有成分及样品测定结果选择确定, 这在前期源解析工作中已有了较为成熟的结论。

1.3 呼和浩特市大气降尘研究进展

阴山呼和浩特段位于内蒙古高原与土默特平原的交界处, 相对高度在 600-800 米间, 是研究区—土默特平原及内蒙古高原间物质迁移的一个屏障。该研究区处于季风区与非季风区的过渡带上, 季风环流十分明显, 是我国农牧交错带上的一段, 生态环境非常脆弱。受季风环流的影响, 土默特平原与内蒙古高原在地表组成物质迁移过程中有密切的关系, 尤其是沙尘暴天气发生时, 地—气系统间会有强烈的物质交换, 弱的阴山屏障已不能起到很好的阻挡作用, 内蒙古高原表土会向东南方向迁移、沉积, 对位于土默特平原上的呼和浩特市的大气 TSP 产生重要影响, 增加了大气 TSP 的含量, 并改变了其成分, 成为呼和浩特市大气降尘的重要尘源。

在内蒙古自治区, 沙尘天气对环境产生的影响十分强烈, 每年冬春季节, 受大风

沙尘影响,大气环境质量有明显下降。不少学者对该区沙尘暴的影响、起因、来源、周期、治理措施作了大量研究^[53, 80, 81, 84],对内蒙古沙尘暴的下垫面条件演变^[78-79]、预测预报方法^[80-81]、天气气候特征^[10]等也做了不少工作,受其研究内容侧重面小及定量研究较少的影响,研究结论对于从根本上推进本区生态环境改造与建设的力度远远不够,还需要花大力气下大功夫进行研究。

呼和浩特市是内蒙古自治区首府城市,包括玉泉区、赛罕区、新城区、回民区四个部分,城区人口 109 万(2004 年底),近些年,随城市化进程的加快,城市用地规模与人口规模不断扩大,城市环境也发生了很大变化。关于呼和浩特市大气的研究多集中在大气污染现状、污染趋势、环境容量、气象及污染特征等方面^[1, 4, 5, 82, 83]。

目前,内蒙古地区大气降尘的源解析工作尚未开展,大气降尘与尘源关系从化学成分方面的研究尚为鲜见。对于呼和浩特市大气降尘及沙尘暴的认识大多停留在感性认识水平上,尤其民众认识水平更低。为加快改善研究区内居住地环境及生产环境,急待探清大气降尘与尘源的具体关系,探清大气降尘具体组成特征。

1.4 研究区选择

呼和浩特市是我国干旱半干旱地区重要的一座首府城市,其城市大气环境特征的研究对于在干旱半干旱地区的城市发展有重要的借鉴意义,对于该区环境改善、经济发展作用重大。内蒙古高原地区是一个古老的剥蚀高原面,其地壳组成物质循与环境演变不仅仅是当地的地理事件,还会通过各种介质作用于相关地区,尤其对其邻近地区会产生明显影响。土默特平原与内蒙古高原仅阴山山脉一山之隔,二者间的联系千丝万缕。因此,本文选择土默特平原上的呼和浩特市及其冬春季风上风向的内蒙古高原地区为研究区。根据研究目的及实验的典型性和可行性,土默特平原上设置两个降尘采样点和三个尘源采样点。一个降尘采样点位于内蒙古师范大学地理园,该样点除了受到沙尘暴降尘的影响外还有来自市区其它各种源的污染,可集中反映市区降尘信息。另一个降尘采样点位于内蒙古和林格尔盛乐校区,因该校处于农耕区,受市区其它源污染很小,主要与农田表土起尘关系密切,其样品可作为市区降尘样品的对比样。内蒙古高原上选择武川盆地典型耕地区、武川盆地北退耕还林草区、达茂旗牧区三个有代表性的区域,在三个区域内选择耕地、林地、草地、多年退耕地、未成林造林地、退化林地等各种用地类型进行取样,以更好反映内蒙古高原表土起尘性质。蒙古国样点选择乌兰巴托西荒漠草原区,该区有零星半固定沙丘。由于采样条件受限制,仅有一个样点样品参与论文分析。

受自然条件的影响,土默特平原与内蒙古高原地区农业结构都属农牧兼营型,有

较大比例的种植业,但内蒙古高原牧业比重比土默特平原偏大。内蒙古高原地区传统的秋季翻耕现象仍普遍存在,这对于此区的起尘是一显著影响因素。内蒙古高原地区在“退耕还林草”政策的指导下,有大面积的幼林地和草地出现,这对表土成分的变化具有一定影响。不同的种植制度及不同的作物类型其表土抗风蚀能力有很大差别^[84]。海春兴等人已对该区土壤风蚀方面有较深入的研究^[85-90]。区别该内容对于项目中详细探究土默特平原降尘与内蒙古高原表土成分相互关系有重要意义。

1.5 研究目的和意义、内容、方法和技术路线

本文通过对土默特平原呼和浩特市大气降尘、道路尘、建筑尘、煤尘及内蒙古高原农田表土进行取样分析,实验测定各样品的 K_2O 、 CaO 、 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Mn 、 Cu 、 Pb 、 As 、 Ti 等多种成分的相对浓度,对部分样品进行了电镜扫描、比表面测定及粒度分析,运用图表法、富集因子法、因子分析法等多种方法探讨了研究区尘暴降尘及非尘暴降尘的理化特征及二者与尘源的关系,探清沙尘迁移时的物质组成变化,为该区降尘研究及沙尘暴和浮尘预防工作提供详细信息和资料。从地球系统角度出发,地表起尘和大气降尘是地壳表层与大气圈之间物质交换的过程之一,探讨“地—气”系统之间物质交换的机制、数量、性质和来源等,对于推动区域生态保护和环境建设具有十分重要的意义。本文以影响本区大气环境质量的主要天气—沙尘天气为重点,同时考虑非沙尘天气,将呼和浩特市采集的大气降尘、道路尘、建筑尘、煤尘及内蒙古高原上采集的表土进行组成成分测定,然后作大气降尘特征、尘源特征、降尘与尘源关系等方面的研究,以期摸清呼和浩特大气降尘的特征、来源,丰富呼和浩特大气降尘的理论研究,推动研究区生产、生活环境改善。

1.5.1 研究目的和意义

随着社会经济的发展,人民生活水平的提高,对环境质量的要求在不断提高,出现了各种监测手段及评价体系。人民网^[91]公布了2003年我国113个国家环境保护重点城市空气综合污染指数排名,选择的综合污染指标是依据环境质量标准将有关的污染物浓度等标化,计算得到简单的无量纲指数,空气综合污染指数数值越大,表示空气污染程度越严重,空气质量越差。参加空气综合污染指数计算的污染物包括可吸入颗粒物(或总悬浮颗粒物)、二氧化硫和二氧化氮(或氮氧化物)三项。在该次排名中,呼和浩特列第34位,其综合污染指数为3.20,在国家环境保护重点城市中,属空气质量较差城市,今后环境治理任务艰巨,需对污染原因加强研究,对污染现状加强监测,进行有针对性管理。

沙尘天气的发生对于大气总悬浮颗粒物含量的影响非常明显,2006年春季呼和

浩特市主要出现了 12 次沙尘天气过程，其中，强沙尘暴过程有 3 次，沙尘暴过程 3 次，集中出现在 4 月份的有 5 次沙尘天气，包括了 2 次强沙尘暴过程。

本文通过对呼和浩特大气降尘及尘源物质的化学成分分析，部分样品的比表面测定和电镜扫描，用因子分析法和富集因子法进行呼和浩特大气降尘源解析工作，用判别函数法分析呼和浩特市大气降尘与尘源关系、尘暴降尘与非尘暴降尘的关系，用对比分析法进行降尘干湿收集法的区别研究，以摸清市区大气降尘污染物的理化性质，探究污染源及分担率，为该区大气污染治理提供基础数据及理论支持。

1.5.2 研究内容

- (1) 降尘量分析；
- (2) 降尘粒度组成分析；
- (3) 降尘比表面分析；
- (4) 降尘电镜扫描分析；
- (5) 大气降尘与尘源关系分析；
- (6) 利用富集因子法及判别函数法进行大气降尘源解析。

1.5.3 方法和技术路线

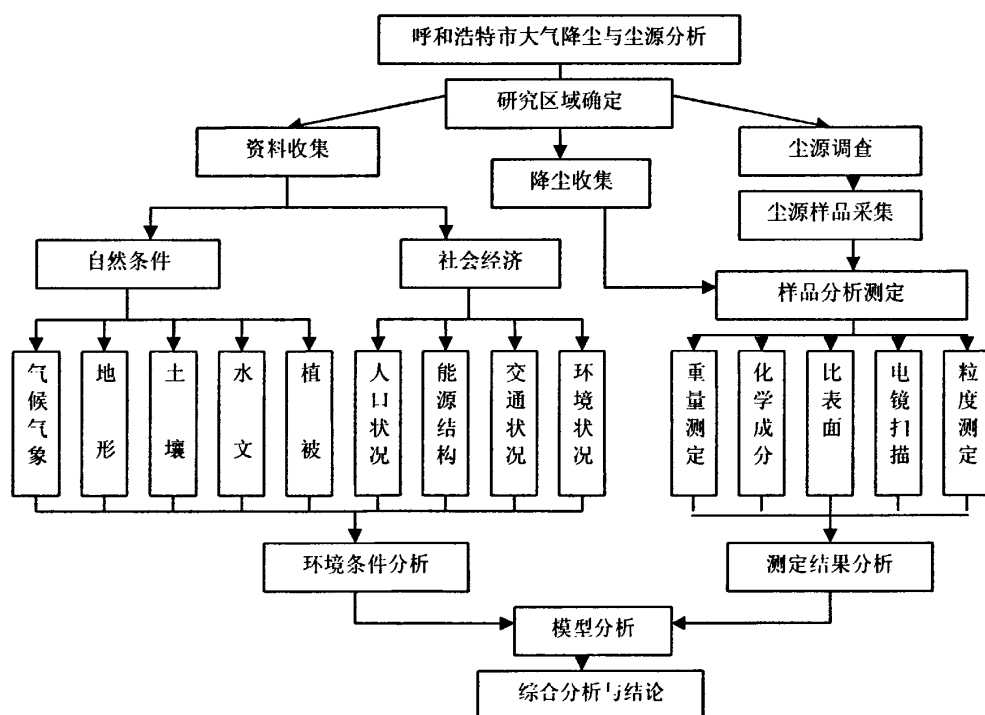


图 1—1 研究方法与技术路线图

本研究通过研究区确定、资料收集、现场采样、室内分析,应用判别函数法、富集因子法进行呼和浩特市大气降尘特征研究与尘源分析,具体流程如图 1—1 所示。

通过以上流程,可分析得出呼和浩特市大气降尘的理化特征,探清呼和浩特市大气降尘的来源,主要找出内蒙古高原表土与呼和浩特市大气降尘的关系。

2. 研究区概况

2.1 自然地理概况

2.1.1 地理位置、地形特征

采样位置分为降尘采样点及表土样品采集点。降尘样品采集点以内蒙古师范大学地理园为主, 兼采集内蒙古师范大学盛乐校区(位于和林县)部分样品。表土样品源区选择在内蒙古高原典型草原向荒漠草原过渡区内, 集中在呼和浩特市西北方向上的农牧区, 包括武川盆地耕地分布区、武川盆地以北退耕还林草区、达尔罕茂明安联合旗草原区, 及蒙古国北部表土样。

呼和浩特市处于大青山洪积扇的中上游, 南以黄河为界, 北依东西走向的阴山, 东临南北走向的蛮汉山。地理坐标为: $110^{\circ} 11' \sim 112^{\circ} 10' E$, $40^{\circ} 36' \sim 41^{\circ} 08' N$ 。地貌由山地、丘陵和平原组成。境内北部和东南部是山地地形, 土默特左旗北部、市区北部及武川县为以大青山为主脉的中低山, 低山丘陵区。东及东南部和林格尔县、清水河县境内是蛮汉山及低山丘陵沟壑区。中部及西南部为土默川平原, 托克托县和土默特左旗^[92]。山地面积为 4826 km^2 , 占总面积的 28.0%, 丘陵面积为 7492 km^2 , 占 43.5%, 平原 4906 km^2 , 占 28.5%。山地和丘陵构成本区地貌主体^[93]。

呼和浩特市以北约 4km 的大青山, 海拔在 1200~1900m 间, 沟谷纵横, 山高坡陡, 相对高差 300—800m, 是呼和浩特市与其北部内蒙古高原的一道重要界限。市区位于大青山南麓山前倾斜平原之上, 地形自山麓向南西缓倾。山麓地带海拔 1120m, 到市区南的小黑河附近降至 1035m, 总坡降 12‰。京包铁路以北, 地形坡度较大, 坡降 20‰。以南地势较平和, 坡降 2‰左右^[94]。

武川县位于内蒙古自治区中部, 阴山北麓, 首府呼和浩特市北, 总面积 4885 平方 km。全境在北纬 $40^{\circ} 47' \sim 41^{\circ} 23'$ 、东经 $110^{\circ} 31' \sim 111^{\circ} 53'$ 之间。县境东西长约 110km, 南北最宽约 60km。县境东南部和南部与呼和浩特市新城区、回民区和土默特左旗相连; 西南和西部与包头市土默特右旗、固阳县毗邻; 北部与包头市达尔罕茂明安联合旗(简称达茂旗)、四子王旗接壤; 东与乌兰察布市卓资县交界。

包头市达尔罕茂明安联合旗地理坐标为东经 $109^{\circ} 16' \sim 110^{\circ} 25'$, 北纬 $40^{\circ} 20' \sim 42^{\circ} 40'$, 位于内蒙古自治区中北部, 东与乌兰察布盟四子王旗毗连, 西与巴彦淖尔盟乌拉特中旗交界, 南与呼和浩特市武川县和包头市固阳县为邻, 北与蒙古国接壤。地处东经 $109^{\circ} 16' \sim 110^{\circ} 26'$, 北纬 $41^{\circ} 14' \sim 42^{\circ} 44'$ 。

蒙古国位于我国以北, 其南界与内蒙古自治区北界相接。蒙古国采样点坐标为 $105^{\circ} 52' 39.3'' E$, $47^{\circ} 50' 36.7'' N$, 海拔 1217m。



图 2—1 研究区位置图

2.1.2 气候与气象特征

呼和浩特地处长城以北，深居内陆，冬季受蒙古高压控制，夏季受夏威夷高压控制，属于中温带大陆性季风气候，四季分明。冬季漫长严寒，夏季短暂炎热，春秋两季气温变化剧烈、气候干旱、昼夜温差大、无霜期短、光热充足、多风、多旱有涝，受阴山影响，大青山以北的武川地区，气候大陆性较南部显著。年平均气温由北向南递增，北部大青山区仅在 2°C 左右，南部达到 6.7°C 。最冷月气温 $-12.7^{\circ}\text{C} \sim -16.1^{\circ}\text{C}$ ，最热月平均气温 $17^{\circ}\text{C} \sim 22.9^{\circ}\text{C}$ 。平均年较差为 $34.4^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，平均日较差为 $13.5^{\circ}\text{C} \sim 13.7^{\circ}\text{C}$ 。无霜期：北部山区为 75d，低山丘陵区 110d，南部平原区 113—134d。日照充足，年日照时数为 2960h，日照百分率 56%。降水地域分布是西南最少，年降雨量在 350mm 左右，平原区在 400mm 左右，大青山区在 430~500mm；最多的是大青山一前响村，年均降水量达到 534.6 mm，其次是井乡，年均降水量为 489.3mm；最少是在南坪乡、黑城乡、新营镇一带，年均降水量仅为 335.2~362.8mm。春季风大，夏、秋风和日朗，冬半年主导风向是西北风，夏季为西南风或东南风，年平均风速为

1.8m/s, 年平均大风出现日数 26.9d, 且多集中在春季。降水与气温条件主要通过影响植被状况进而影响沙源起沙强度。在高温干旱的年份, 植被稀疏, 加之大风的发生, 非常有利于该区表土物质随风向外输送。

呼和浩特市全年降水量在 250~700mm 之间, 由图 2—2 知, 最近十年中, 1999 年降水量最少, 2003 年降水量最多。降雨时空分布极不均匀, 多年平均降水量 386.9mm。年平均气温 7.7℃, 由图 2—3 可知, 从 1996~2005 年, 年平均气温有升高的趋势。

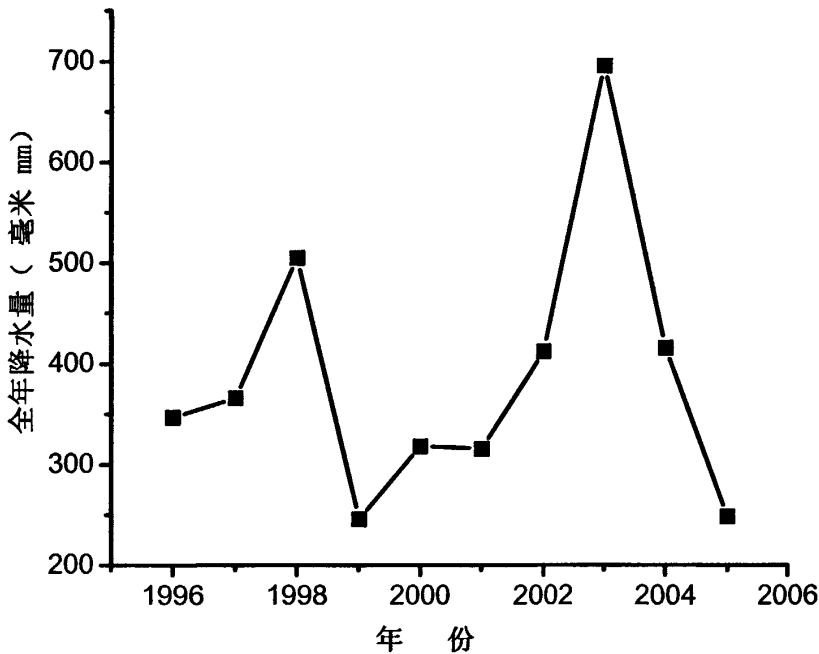


图 2—2 呼和浩特 1996—2005 年降水量变化图

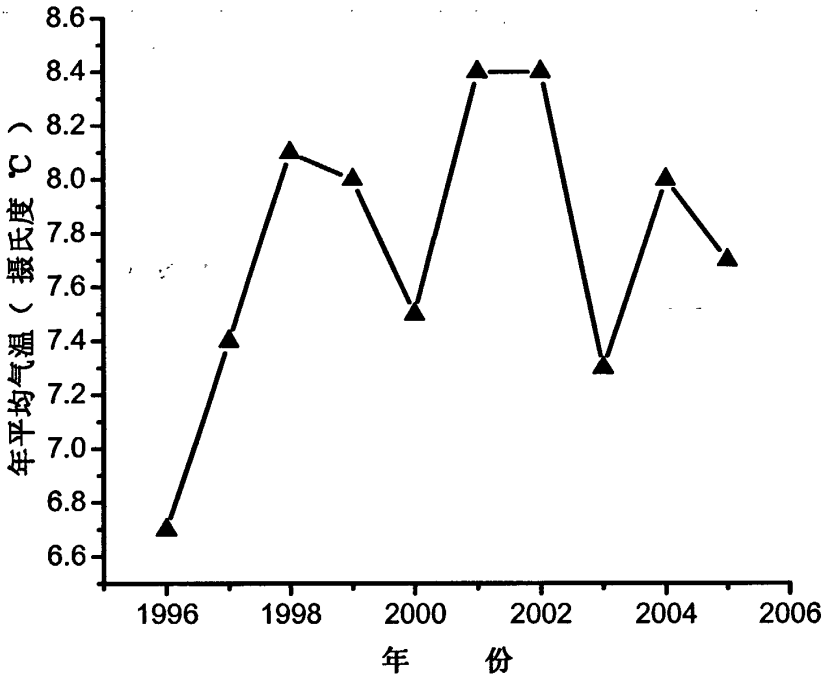


图 2—3 呼和浩特 1996—2005 年年平均气温变化图

通过 1991~2000 年探空资料分析呼和浩特逆温类型主要是贴地逆温，悬浮逆温列为其次。逆温年出现频率为 82%，07 时为 78%，比 19 时多 29%。其中贴地逆温占 64%，悬浮逆温占 36%。一年中，冬季逆温出现频率最高，其次是秋季，夏季频率最低，冬季清晨无逆温日数仅为 10%。逆温层厚度随季节而变化，冬季厚度最大，贴地逆温平均厚度为 230m，最大厚度可达 1000m 以上，顶高最多出现的高度在 100~200m 之间，频率为 48%，保证率达 65%。悬浮逆温平均顶高在 710m，底高在 490m，平均厚度 225m，其顶底高度均为冬季最高，夏季最低。

表 2—1 呼市贴地逆温生、消及持续时间/时：分

月 份	生成时间			消散时间			持续时间/时		
	最早	最晚	平均	最早	最晚	平均	最短	最长	平均
1	16: 00	20: 45	18: 14	8: 00	11: 00	9: 40	12.8	17.5	15.5

4	17: 15	22: 00	19: 40	6: 20	10: 00	7: 40	10.0	14.5	12.0
7	17: 30	23: 45	19: 50	6: 30	9: 00	7: 15	7.5	14.0	11.5
10	17: 10	20: 35	18: 30	7: 40	9: 20	8: 25	12.0	15.0	13.7

冬秋季节贴地逆温一般 18 时以后生成，次日 9 时左右消散，持续时间长达 15 个小时。而这期间呼和浩特天气寒冷，城市居民取暖及工厂燃烧的燃料都有明显增加，排放到大气中的污染物质也增多，使得城市大气污染浓度增高。辐射逆温出现频率高、厚度大、强度高、维持时间长，限制了大气污染物的稀释和扩散，是呼和浩特市冬季污染物浓度高污染严重的主要原因之一^[95]。频繁出现的逆温层结极不利于该地区大气中包括尘埃在内的各类污染物质的扩散，此时的大气降尘以市区内污染源产生的降尘为主。

山谷风：地处川地的呼市市区，与北面的大青山相对高度为 800~1200m 之间，受局地热力的影响，存在着明显的山谷风环流。白天形成自南面的川地吹向大青山的“谷风”。相反，夜间又形成了自大青山吹向川地的“山风”。山谷风的作用使呼市白天易吹偏南风，夜间易吹偏北风。

“热岛环流”：由于城市人口密集，工业集中，机动车辆多，工业、交通、生产生活每时每刻都要释放出大量的热量和温室气体，使城市地区的气温比郊区要高出许多。在城市和郊区的对比观测中发现，冬天呼市城区的温度可以比郊区的温度高出 5~10℃。这样的热力差便造成市区上空的空气受热上升，而周围郊区温度较低的空气会沿地面向市区辐合，从市区上升到高处的空气冷却后又向城市周围地区辐散，于是就形成了“热岛环流”。“热岛环流”的强弱与城市规模和天气条件有关，大气越稳定，城市规模越大，“热岛环流”越强。

通常呼市出现地方环流时，各测点所观测到的地面流场主要是“热岛环流”、山谷风和峡谷效应这几种气流的合成结果^[83]。这种环流作用使的城区与周边地区产生多种形式的“地—气”系统间的物质交换。当“热岛环流”较强时城区与郊区物质交换较强烈，城区污染物向郊区扩散明显，因风力较弱，粗重颗粒物迁移较少。当山谷风与峡谷效应强烈时，阴山地区表土向市区输移明显，因风力较强，粗大颗粒物也较多。

近地层风场特征：呼和浩特地面盛行风向是西北(NW)风，年风向频率为 8%，各月主导风向冬半年 10~4 月为西北(NW)风，其风向频率 7%~11%，夏半年 5~9 月主导风向是西南(SW)风，频率 6%~9%。从近地层 500m 以下各层风向看，在没有大的天气系统过境时，风向随高度不同出现明显变化，一般在 300m 以下以偏北风为主，300m

以上以西北风为主。从风速来看,地面年平均风速为 1.8m/s ,各季风速以春季最大,达 2.5m/s ,其余三季在 $1.5\sim 1.6\text{m/s}$,月平均风速4月最大,为 2.7m/s ,8月最小仅 1.2m/s 。

城区风速较小:由于城市中大量建筑物的存在阻挡地面气流的运行,造成城区地面风速的降低。将呼和浩特城区、郊区、土左旗地面风速资料统一订正到 10m 高处比较,年平均风速城区比郊区低 0.1m/s ,比土左旗低 0.2m/s ,年最大风速城区为 18.0m/s ,而郊区为 21.7m/s ,土左旗达 $27.0\text{m/s}^{[96]}$ 。城区风速较小时不利于城区大气污染物质的扩散,造成城区大气污染较郊区和农村更易发生。

内蒙古师范大学盛乐校区地处和林县境内,属西北高原大陆性风候,其主要特征是,干旱、多风、寒冷,日照充足,温差大,冬季漫长而寒冷,夏季时短而温热,春季升温快,秋季降温烈。降雨量以8月份最多,12月份最少,雨量相差比较悬殊,大陆季风气候特点明显。从各季来看,春季3-5月份降雨量 63mm ,占年降雨量的 15.1% ,这是出现春旱的主因。夏季6-8月份降雨量 250mm ,占全年降雨量的 59.3% 。秋季9~11月份降雨量 96mm ,占全年降雨量的 23.1% 。冬季12至1月份降雪量 11mm ,占全年降雨量的 2.5% 。本区常年多西北风,间有西南风,平均风力为2级,最大风力8级,最大风速为 24.5m/s 。夏秋季也有东南风,风力不大,遇有东南风时会出现降雨天气。大风天数,每年平均 14d ,多在3-5月份,最多可达 23d 。

武川县 2000 年到 2005 年平均气温 3.64°C ,年日照总时数 2932.8 小时,年平均降水量 338.32mm ,年平均蒸发量 1728.64mm ,无霜期 122.25 天,全年大风日数 23 天,2005 年有 35 天。武川地区气温较低,年蒸发量远大于年降水量,干旱且多大风。武川县风能资源丰富,多年平均风速 3.6m/s ,日平均风速大于或等于 8m/s 的日数年均 116.4 天,大于或等于 17 米/秒的大风年均 39 天。自 1960 年有记录以来,瞬间最大风速达 12 级。一年中春季风速成最大,冬季最小。一年中风向很有规律。4~9 月多为南风,是夏季风盛行时期;12 月~3 月多西北风,此时期在冬季风控制之下。各风向出现频率,除静风占 30% 外,西北风最多,占 10% ,南风次之,占 9% ,偏东风出现频率最小,约占 1% 。一日中,风速的变化成单峰型,日出后风速逐渐增大,到午后 $14\sim 15$ 时为最大,之后风速逐渐减小,到夜间 $2\sim 3$ 时为最小。大风给农业生产带来危害。春季大风吹走表土,夹带泥沙,形成“沙暴”,当地称作“大黄风”。全县历年平均沙暴日数 7.5 天,最多可达 16 天。

表 2—2 武川县各月风速及大风沙暴日数

数 据 项 目	月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全 年
风速(m/s)		2.9	3.2	3.9	4.8	4.8	4.1	3.2	2.9	3.1	3.3	3.4	3.0	3.5
大风	平均	1.7	2.5	4.9	6.9	7.2	4.7	2.4	1.2	2.0	1.4	2.0	1.0	39
(d)	最多	8	8	12	16	16	10	8	6	4	6	5	7	74
沙暴	平均	0.3	0.7	1.4	2.5	1.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0	0.2	0.3	7.5
(d)	最多	3	4	5	7	5	2	1	1	1	0	1	2	16

达尔罕茂明安联合旗地处温带，属温带大陆性干旱气候，冬季漫长寒冷，春季干旱风沙多，夏季短促凉爽。年平均气温 3.4℃，一月平均气温-15.9℃，极端最低气温-41℃，七月平均气温 20.5℃，极端最高气温 36.6℃。日平均气温 5℃以上持续时间最长 192 天，最短 157 天，无霜期 90~120 天，年日平均气温 0℃以上持续时间最长 227 天，最短 183 天。年平均降水量 256.6mm，且多集中于七、八两月，年最多降水量 400.3mm。年最少降水量 142.6mm，一日最大降水量 90.8mm。

蒙古人民共和国的北部，年降水量约为 250~300mm，南部戈壁中，年平均降水却不超过 110~130mm。处于肯特山与杭爱山以南和西南部的地区明显较干燥，大陆性气候也较处在北部的地区较强。蒙古气候的另一特性，除降水量极少之外，还带有季节性的特征。普遍以暴雨的形式下降，而且夏季降水量(150~200mm)最大，秋季较少(25~40mm)，冬季最少(4~7mm)。春季的降水也很少(20~40mm)，因此，田间作物和自然草类在每年的这一时期中常常因缺乏水分而凋萎，不能生长。在蒙古人民共和国的南部，春季的空气湿度一般不超过 35~43%，而在夏季雨期可升至 54~56%，这样的空气湿度对植被和土壤的发育都产生了强烈的影响。蒙古春季经常为强风统治，这里最主要的风是北风和西北风。强风和暴风在戈壁中很多，风力常达最大的速度。蒙古冬季的特征是严寒(-40℃~-50℃)，大气降水量少(4~7mm)，也经常有晴朗的天气和占治地位的强烈的西北风。蒙古的冬季降雪很少。因此，在蒙古领域上绝大部分的土地，差不多整个冬季几乎完全没雪，或有呈斑点状的雪保留下来，仅只有高山顶峰和森林地段例外。在严寒开始时，暴风给少雪的冬季所带来的不是雪而是尘埃。蒙古的冬季多西北风，常常很强烈，有时转为风暴。风暴从蒙古较高的山原掠过，而到平缓的戈壁平原和我国北部各省。

2.1.3 水文状况

呼和浩特市属于黄河流域，黄河流经南部，主要支流有大黑河、浑河等河流以及

许多季节性山间小溪和干沙河, 水系不够发育, 河网密度稀疏, 地表水贫乏, 地下水比较丰富。山前由洪积扇裙组成的山前倾斜平原的地下水为孔隙潜水, 埋深浅, 水质好, 径流条件好, 水量较为丰富, 是呼和浩特市供水的主要水源。由于呼和浩特市地处半干旱环境中, 河流大部分为季节性河流, 常在下游形成大大小小的咸水湖。该区河流总长度为 1155km, 主要水库有万家沟水库、石咀水库、五一水库、红领巾水库等, 哈素海是境内最大的湖泊, 总面积 32 km²。^[92]呼和浩特市河流总长度 1075.8km, 河网密度为 0.177 km / km²。对城市有供水意义的 2148.6 km² 范围内, 可利用水资源总量为 32765.6 万 m³, 其中地表水为 12270.6 万 m³, 占全市水资源总量的 37.4%。地表水特征主要表现在: 地表水资源匮乏, 年际变幅大; 丰枯水年交替出现; 年内变化大; 地区分布有明显规律。水资源可利用量逐年减少; 水体污染加重。地下水的变化特征: 地下水资源有限, 水位动态季节性变化明显; 水位年际动态特征表现为缓慢下降; 漏斗范围逐年增大。^[97]由于区域整体表现出水资源紧缺的特征, 所以从区域环境来看, 不利于沙尘吹扬的抑制。

武川县境内主要河流有 8 条, 内、外流河各 4 条, 分属内流塔布河和外流黄河支流、大黑河两大水系。内流河均向北流, 外流河均向南流, 多为季节性间歇河流, 水量不大。外流河进入山区后, 才有地表径流。内流河则是雨大山洪暴发, 天旱河床干涸。年地表径流量共 1.300 亿 m³, 其中外流河 1.091 亿 m³, 内流河 0.193 亿 m³, 客水 0.027 亿 m³。径流与降水时空分布规律一致, 径流深在 5~50mm 之间, 全年平均 27.2mm, 流量 0.03~0.05 m³ / s。河网密度 0.067km / km²。6 个小湖泊, 总面积尚不足 0.2 km²。境内地下水总储量约 87.62 亿 m³, 主要由潜水和承压水两部分组成。其中潜水 42.03 亿 m³, 承压水 45.59 亿 m³。地下水的水质比较优良。水位埋深因地形而异, 在 8 条主要河流交汇处 1~3m, 丘陵区 5~15m, 南部山区 20~50m。

达尔罕茂明安联合旗内有腾格淖尔、乌兰淖尔、赛打不苏、哈拉淖尔、呼和淖尔和田古木淖尔 6 个水系。河淖面积 6 800km², 主要河道有 9 条, 总长 742.6km。艾不盖河是全旗最长的河流, 全长 154km, 流经两乡、一镇、四苏木, 注入腾格淖尔。其它主要河流有查干布拉河、开令河、乌兰苏木河、塔布河、讨来图河、乌兰伊更河、阿固其高勒河、扎达盖河等, 总流域面积 13 938km², 百灵庙镇以南为产流区。主要湖泊有腾格淖尔、哈日淖尔、赛打不苏等。河网密度约 0.8km / km², 径流总量 2422 万 m³。

2.1.4 植被

呼和浩特市植被种类较为齐全, 乔灌木品种繁多。从北向南由森林草原逐步过渡

为灌丛草原、草甸草原和典型草原。同时,有草甸植被、盐生植被和沼泽植被相间分布。其中,典型草原植被分为四种类型:森林草原灌丛类型,丘陵草原类型,沙地草原类型和低平草甸草原类型。山地阴坡、半阴坡部位,属于次生山杨白桦林区;山地阳坡、半阳坡部位,属旱生灌丛林区^[98]。北部山地海拔 1700m 以上阴坡有山杨、白桦天然次生林,海拔 1600m 以下山地灌丛和典型草原植被,中部平原地区的山前倾斜平原主要是地带性的典型草原植被,冲积平原为农田及草甸、沼泽等。东南部山地区自然垂直带谱明显,从山顶到山麓有山地草甸带、山地森林灌丛带和灌丛草原带,南部黄土丘陵区自然植被以旱生灌丛草原为主^[93,99]。

城市街道绿起到美化环境、减弱噪声、消除污染、增加大气湿度、降低城区温度的作用。呼和浩特市共有街道树 3 万株,11 个品种;2005 年园林绿地面积 3371.4ha,公共绿地面积 937.5ha,建成区绿化覆盖面积 3725ha,人均拥有公共绿地面积 8.55 m²,环境条件尚不能适应现代化首府城市的建设要求。公路绿化中,绿化标准低、树种单一,除高速公路外,呼市其它等级公路的绿化还处在公路两侧栽植数行行道树水平上,而且树种较为单一,以阔叶的杨柳树为主,林带缺乏层次,其防风、防雪等防护功能差。在防风沙方面存在问题非常明显。

由于存在以上一些绿化问题,使得市区大气环境自净能力较低,这极不利于空气中尘埃物质的去除以及地面起尘的抑制,使的污染源产生的物质能够大范围传播,大风天气地面尘埃再次起尘强度较大。

据测定,目前在呼和浩特市大部分街道行道树下“雨季”前的 6 月中旬其土壤含水量为 4.5%,而且有逐年降低的趋势,“雨季”后的 9 月份也只有 6.2%,连土壤本身的持水能力的 80%都达不到,根本没有深层入渗的可能。可见在城区范围内,不仅雨水对地下水毫无补给能力,就连树木本身的生理需水也满足不了,长期处于“营养不良”状态,因而抗旱,抗病能力低下,长势微弱,枝叶稀疏,叶色灰黄,夏季常有干叶、落叶现象,“未老先衰”,有的甚至完全死亡。树木改善生态环境的功能不能得以充分发挥。由于地下水位下降,树木枯萎,土石裸露,水土流失逐年加剧,抗御风沙和对空气的自然净化能力以及对气温,湿度的调节能力显著降低。^[100]

2.1.5 土壤

呼和浩特市主要的土壤类型有灰色森林土、灰褐土、粗骨土、新积土、栗褐土、潮土、盐土、沼泽土、风沙土等,分布在呼和浩特的不同区域。前期作者所在的课题组对该区土壤性质有较为深入的研究。冬春季节是该区风力强劲,风沙吹扬最为严重的季节,其上风区土壤的可蚀性对于向该区的表土物质吹扬产生重要影响。在前期研

究中,利用电导率、有机碳、土壤粒度组成等因子经过风蚀方程计算,对该区冬春季节上风区土壤的可蚀性有了一定认识。经过数据分析得出,在阴山北麓不同土地利用的土壤平均潜在可蚀性关系为:草地<灌丛<林地<耕地。所以在阴山北麓应特别加强对耕地的保护,退耕还林草,减小其潜在风蚀性。

春季随着温度的升高,土壤在冻融作用下产生风蚀现象,土壤可蚀性相应地变大。但随着温度的继续升高,土壤温度和湿度环境发生了变化,土壤潜在可蚀性降低,但这种变化并不是持续的。

土地利用方式不同,土壤表层的理化性质、地表状况也会产生一定的差异,从而导致了表层土壤的潜在风蚀性的不同。在第一次采样中耕地的土壤可蚀性最小,为 57.05%,草地的土壤可蚀性最大,为 72.19%,其它土地类型的土壤可蚀性居于二者之间,如未成林造林地的土壤可蚀性为 65.79%,灌丛地土壤可蚀性为 62.25%等。

人类活动在土地利用过程中起主导作用,它是叠加在自然因素之上的影响土壤潜在风蚀性的人为因素。阴山北麓草地的平均土壤潜在可蚀性最小,为 63.82%,耕地的平均土壤潜在可蚀性最大,为 66.05%,灌丛和林地居于其中,分别 64.58%和 64.88%。

实验得出,土壤粒径 $>2\text{mm}$ 和 $<0.002\text{mm}$ 的颗粒所占百分比一般不大,约在 22%以下,草地略高一些约占 46%,这部分物质很难受风蚀,因为大粒径的土壤颗粒不易被吹动,小直径的土壤颗粒其粘着性强也很难吹动^[101]。可风蚀物质主要集中在 $0.002\sim 2\text{mm}$ 段,而此部分物质所占比例又较大,约在 78%以上。从阴山北麓表土粒径组成可以看出,该区有起尘的良好物质基础,在大风天气下会发生大规模的沙尘飞扬现象,进而成为下风向的尘源。呼和浩特市位于其冬春季风的下风向,阴山北麓表土在大风吹送下,严重影响呼和浩特市的大气环境。

2.2 社会经济概况

2.2.1 人口、经济与产业

2005 年呼和浩特市城市人口 109.62 万人,城市面积 2054Km^2 ,建成区面积 143Km^2 ,市区人口密度 534 人/ Km^2 。是一座以蒙古族为主体,汉族为多数,满、回、朝鲜等 36 个民族共同居住的地区。2005 年,呼和浩特市实现国内生产总值 743.66 亿元,比上年增长了 45%,其中第一产业产值为 47.17 亿元、第二产业产值为 277.76 亿元、第三产业产值为 418.73 亿元。人均生产总值已达 29049 元,比上年增长了 42%。由图 2—4 与图 2—5 看出,在 1996~2005 年期间,国内生产总值和人均生产总值都一直在上升。

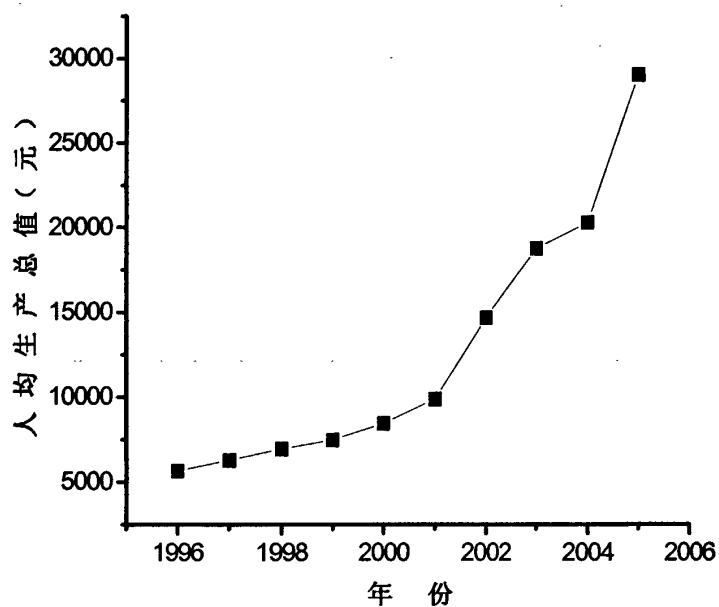


图 2—4 呼和浩特 1996—2005 年国内生产总值变化图

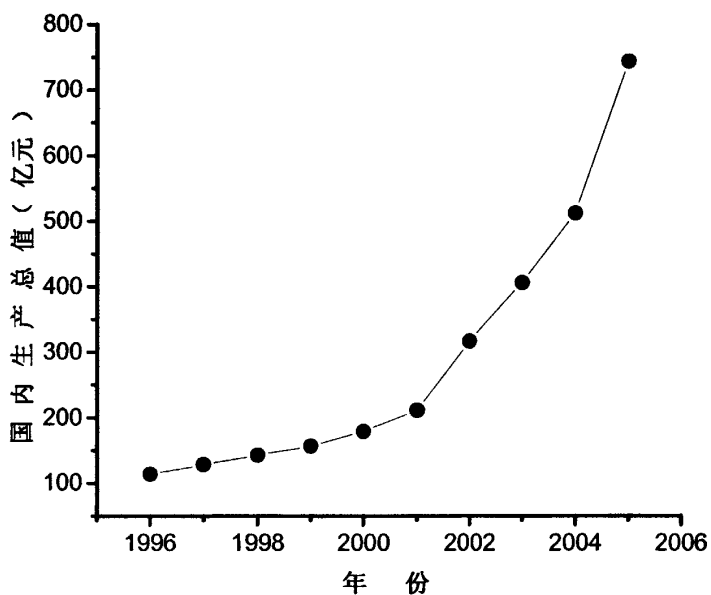


图 2—5 呼和浩特 1996—2005 年人均生产总值变化图

商贸流通、交通运输等传统服务业在竞争中发展壮大,金融保险、信息咨询、现代物流等新兴服务业迅速成长。实施“工业兴市”战略后,极大推进乳业、电力、电子信息、生物制药、冶金化工、机械制造等优势特色产业的发展,有效地促进了工业经济的快速增长和工业结构的优化升级。2005 年呼和浩特市总耕地面积为 509.47 千 ha,人均耕地约为 0.2ha,其中有效灌溉面积为 181.94 千 ha,占总耕地面积的 35.7%。粮食产量为 114.83 万吨,主要农作物为小麦、玉米、杂粮。

武川县为半农半牧区。据 1992 年土地详查结果,全县总面积 4708.2km²,耕地面积 10 余万 ha,农作物以小麦、莜麦、马铃薯为主,经济作物有胡麻、油菜籽等,土特产有白蘑和黄芪、党参、赤芍等中药材。矿产主要有煤、铁、钨、铅、云母、大理石、石灰石、石棉、石墨等。已建起采矿、发电、农机修造、建材、皮革、食品、印刷和粮食加工等工业企业。1998 年,全县有汉族、蒙古族、回族、满族等 16 个民族,总人口 17.2 万人,其中农业人口 14.2 万人。

达尔罕茂明安联合旗是一个以蒙古族为主体、汉族占多数、多民族聚居的边疆少数民族地区,总面积 17410km²,其中天然牧场面积 1.66 万 km²,占总面积的 89.5%,耕地面积 7.5 万 ha。2005 年,生态治理成果不断扩大,风沙源治理面积 2.81 万 ha,实施退耕还林工程 0.7 万 ha。主要产品铁精粉生产建设总规模达 500 万吨,产量达 302 万吨,同比增长 150 万吨,成为内蒙古自治区铁精粉生产第一旗。

2.2.2 能源结构

呼市周边不仅有大量的小煤窖,而且有我国大型露天煤矿之一的准格尔煤田。丰富的煤炭资源为呼市的经济、社会发展提供了能源保障,因而形成了以煤炭为统治地位的能源消费格局。“八五”期间,呼市煤炭年平均消费量占全年能源总消费量的 72.45%。2005 年全市煤炭消耗总量 1300 万吨左右,是上世纪末的近 4 倍。城区煤炭消耗总量 577 万吨,其中工业 380 万吨/年,城区房屋建筑采暖 145 万吨/年(除热电联产外,集中供暖热源耗煤 36 万吨,分散采暖耗煤 109 万吨),其他餐饮和公共生活耗煤 52 万吨。呼市能源消耗的基本特点是:

1、煤炭是主要能源。2、耗能密度高。3、居民清洁能源比重小。4、采暖期耗煤占总耗煤量的 67.5%。而且 80%又集中消耗在十一、十二、一、二 4 个月份,在全市能源消费中占很大比重。^[102]

2.2.3 交通状况

2005 年末呼和浩特市实有公共汽车 828 辆,出租车 3950 辆,平均发车时间间隔为 5 分钟,客流高峰时期内随机调整时间间隔。这样造成了高峰时道路拥挤不堪,车速

下降，路尘飞扬，不完全燃烧的车辆尾气排放严重。表 2—3 中给出了城市建成区面积，城市道路长度、面积，公交营运车辆数。

表 2—3 呼和浩特市城市建设“十五”计划及 2015 年远景发展目标

项目	单位	1995 年实际	2000 年实际	2005 年计划（实际）	2010 年	2015 年
城市建成区面积	km ²	77.85	83.03	100（143）	110	120
城市道路长度	km	324	414.9	595（铺装 531.6）	830	1077
城市道路面积	万 m ²	289	483.8	935（1074.1）	1434	1953
公共运营车辆	辆	265	366	700（828）	1030	1350

2.3 呼和浩特市大气环境状况

呼市的大气污染是典型的煤烟型污染，以冬季进入采暖期的十二月至来年的二月份最为严重。据环保监测部门的报告，这一期间，总悬浮微粒达到 300-800 微克/标立方米，远远高于国家二级标准 200（三级标准为 300）微克/标立方米的标准。如果按全年平均监督值分析，1997 年，上述两项指标分别为 423 微克/标平方米和 102 微克/标立方米，分别高出国家二级标准的 2.1 倍和 1.6 倍。每年排放到大气中的污染物，烟尘 7.7 万吨，二氧化硫 3.7 万吨，被国家列入二氧化硫污染重点控制区。经污染源评价，各类污染源对大气影响的次序为：居民炉灶，锅炉，商业网点，茶浴，窑炉。仅以烟尘的污染分担率看：居民占 52.13%，锅炉占 37.01%，营业网点占 6.14%，茶炉占 4.4%，窑炉占 0.24%。另外，近几年机动车辆增幅较大，1997 年底，全市各类注册机动车辆总计达 62972 辆，比 1995 年的机动车辆 23815 辆增长 1.64 倍，平均每日还有 4000-8000 辆外地入呼的机动车行驶在城市道路上汽车尾气污染已到了非治理不可的程度。据报告（2005，边占喜），1995-2005 年，呼市国内生产总值增长近 7 倍，环境空气污染不但没有原有基础上随经济增长加重，且表现为明显好转。特别自 1998 年以来二氧化硫减排尤为突出，这与推广使用低硫煤有直接关系。随着 2000 年后城市基础设施建设水平提高和城区面积扩大，大气污染源排放高度提高、高架源减少，清洁能源比例提高，至 2003 年环境空气质量综合指标达到 1996 年来最好水平。2003 年后主要污染物又有加重趋势，采暖季污染明显重于非采暖季现象突出。2005 年全年二级和好于二级的天数达 311 天，各项污染指标较 90 年代明显下降。但不可忽视的是，大气总悬浮微粒年日平均值（TSP）超标现象仍然存在，二氧化硫污染有重新抬头之势，说明煤烟型大气污染依然是呼市空气环境质量的突出问题。

3. 调查分析与实验

3.1 尘源调查分析

为具体了解本研究区域内大气颗粒物来源,对监测点周围及研究区的各类大气颗粒物的污染源进行调查,监测点周围具体污染源情况调查如下。

通过调查发现,研究区内的污染源集中在呼和浩特市及市区周围交通线路上。市区尘源比较复杂,有各类轻工业源、重工业源、交通源、生活源及垃圾处理厂来源等。监测点西五米有单车道一条,机动车流辆较小,车速较低,南七十米有市区交通干线四车道一条,北一千米有两车道一条,以交通尘为主,受交通影响,道路所积尘土常有反复飞扬到空中的现象;监测点北与东北方向五十米有运动场,南十米有气象观测园,以土壤尘为主;观测区内有小型烧水锅炉一台,日燃烧蜂窝煤 2 吨,无除尘设备,东北两千米有大型取暖锅炉,有除尘设备,以煤烟尘为主。附近无大型建筑工地,但在自治区迎六十大庆之际整个市区建筑业发展快速,施工点多面广,规模较大,房屋建筑施工面积 830.1 万 m^2 ,建筑尘排放量大;另呼和浩特市西部有水泥生产场,2005 年年生产水泥 131.65 万吨,在西风天气情况下对市区建筑尘贡献量也较大;呼和浩特市 2005 年生铁年生产量 11.55 万吨,对金属尘排放有大的贡献;另在大风天气发生时,沿风向路径的各类尘源皆有可能影响本区,尤以土壤尘与沿线运输车辆吹扬煤尘及上风区煤场吹扬煤尘明显。

3.2 算法原理

3.2.1 判别函数分析原理

判别函数为 $DF = |(CX_1/CX_2) / (C_{ref1}/C_{ref2}) - 1|$, 式中 CX_1/CX_2 表示待判采样点沉积物中两种元素的比值, C_{ref1}/C_{ref2} 表示标准端元沉积物(来源沉积物)中这两种元素的比值。一般来讲 DF 值的绝对值小于 0.5 即认为两种沉积物性质接近,属于同源物质。

3.2.2 富集因子法原理

富集因子法中,富集因子 EF 的求解表达式如下:

$$EF = \frac{(C_x / C_{Al})_{\text{降尘}}}{(C_x / C_{Al})_{\text{地壳}}}$$

上式中: C_x —元素 x 的含量, C_{Al} —Al 元素的含量,“降尘”和“地壳”分别表示元素在大气降尘中的含量和地壳中的丰度。其原理为:当 $EF < 1$ 时,认为 X 元素来自自然源;当 $1 < EF < 10$ 时,认为 X 元素既有自然源也有人为源;当 $EF > 10$ 时,认为 X 元素来

自人为源。用富集因子法(EF)对测得数据进行了分析与处理,可以定性地判别大气降尘中各元素来源。其中选取参比元素应遵从以下原则:所选元素含量应有一定稳定性,所应用的方法对该元素有足够高的灵敏度,测定结果足够准确,该元素最好为参比体系(或参比物质)中的主要组成元素,该元素又在样品中普遍存在。据以上原则,有人以Fe作为参比元素(陈宗良等,1985;汪安璞等,1988),也有人用Si, Ti(毕木天等,1984;滕恩江等,1999;陶俊等,2003),然而应用最多的参比元素为Al(杨丽萍等,2002;沈轶等,2002)。本论文选Al作为参比元素。地壳中元素的丰度参照黎彤1976年值,见表3-1:

表 3—1 地壳中元素的丰度 (PPm)

元素	As	Cu	Pb	Mn	Ti	Al	Na	Mg	Si	K	Ca	Fe
丰度	2.2	63	12	1300	6400	83000	23000	28000	290000	17000	52000	58000

据黎彤(1976)

3.2.3 标识元素的选定

在确定了污染源种类的前提下,需为每个污染源选择“标识元素”,又称特征元素。所谓的标识元素,就是指那些能表征排放源固有特征并且在迁移过程中变化不大的元素,作为标识元素的条件是该元素应占污染源排放总量的重要部分(一般应大于10%,该条件在具体标识元素选择时往往被放宽),且该元素在其他污染源的排放物中不应存在或存在很少。由于具体研究的地区不同,地理、气象及经济特点不同,各地的主要污染源不同,因此所选择的标识元素也不同。

国内外学者对不同来源的大气颗粒污染物作了大量研究(Taylor 1982;杨丽萍,2002),区分出不同污染源的主要排放元素,各类污染源排放的主要元素见表3-2。

表 3—2 各类污染源排放的主要元素^[107]

来源	主要排放元素
土壤	Si、Al、Fe、Ti、K、Ca、Na、Mg、Mn、Eu、Yb、Ba、Rb、La、Ce、Lu、Sm、Th、Cr、Sm、Th、Cr、Sc、Co、Cl
燃煤	I、As、S、Se、Si、Al、Fe、Ti、Ca、Mn、Cr、Co、Cu、Pb、Zn、Hg、Br、V、Ni、Sc、La、Ce、Th
燃油	V、Ni、Co、Cu、Hg ^①
垃圾焚烧	Zn、Cd、Sb、Cu

汽车尾气 Pb、Br、Ba、Cl、Cr^②、Co^③

海盐 Na、Cl

金属冶炼 Cr、Cu、Zn、Fe、Mn、Ni、Cd^④

建材 Ca

据①刘俊华等(2001); ②、③张辉等(1998); ④成杰民(1997); 其余据杨丽萍(2002)

据国内外资料的报道,一般选择土壤中的 Al 和 Si,煤烟尘中的 Al 和 As 或 Ti。本文根据前人研究成果及实验结果,将呼和浩特大气降尘的标识元素确定为: As 作为煤烟尘的标识元素, Ca 为建筑尘的标识元素, Pb 为道路尘的标识元素, 土壤尘的主要贡献元素为 Si、Al、Fe、Ti、Mg、Mn 等,充分考虑当地排放的特征,选择合适的元素参加模型进行拟合运算。

3.3 样品采集处理与理化性质测定

3.3.1 样品采集处理

3.3.1.1 降尘样品采集处理

降尘样品采集点设于内蒙古师范大学地理园三楼顶,距地面约十米,受近地面干扰因素较少。采样时间为 2006 年 3 月到 2006 年 9 月,以月为周期用湿法和玻璃球法连续采集自然降尘样,采集过程中典型沙尘暴样另作收集。并以玻璃球法收集内蒙古师范大学和林盛乐校区(位于内蒙古师范大学南 42km 处)沙尘暴样以作对比分析。

表 3—3 降尘样编号信息

样号	A	B	C	D	E	F	G
记录	四月非尘	四月非尘	五月非尘	六月非尘	四月沙尘	盛乐校区三	师大三月
	暴干样	暴湿样	暴湿样	暴湿样	暴湿样	月沙尘暴干	沙尘暴湿
						样	样

表 3—4 呼和浩特市月降尘强度

采样时间	1 四月	2 四月	3 五月	4 六月	5 七月	6 八月	7 九月	8 十月
	干	湿	湿	湿	湿	湿	湿	湿
(g/m ²)	75.51	134.54	35.85	23.62	26.46	9.38	8.31	8.92

湿法收集器是采用直径 35.5cm,高 11.5 cm 的塑料盆,内盛约 6cm 深的蒸馏水。玻璃球法收集器与湿法收集器类似,仅将蒸馏水改为直径 1cm 的玻璃球,于同规格塑料盆内铺六层。采集样品风干后过 0.15mm 土壤筛(无大于 0.15 mm 物质),密封待测。

3.3.1.2 尘源样品采集处理

采集呼和浩特市北阴山北麓十四个样点表土样,及蒙古国表土样 1 个,每个样点取三个土样。样点选择典型用地类型后,用精度 5m 的 GPS 定位,用 20×20×4cm 的大平铲自土壤表层向下取 5cm 深表土。将样品于实验室自然风干后擀磨后过 0.15 mm 筛,合并同一取样点土样,制备土壤源样品 15 个。用毛刷扫取市区内柏油道路路面样 2 个,代表市区交通尘,为使样品有好的代表性,样品收集时各沿道路边和道路中央每隔 10m 左右取一次样,共取 100m 左右,分路边和路中央将样品混合。采集家属区取暖锅炉煤烟尘一个,为使样品有好的代表性,取样时在煤尘堆积物的上、中、下三个部位及干燥处和湿润处均进行取样,进行混合。

表 3—5 尘源采样点信息记录

样点	经度	纬度	海拔	土壤质地	植被	用地类型
1	111° 24' 56.1" E	41° 06' 49.1" N	1586	粘沙	胡麻、莜麦	耕地
2	111° 24' 56.1" E	41° 06' 49.1" N	1586	粘沙	胡麻、莜麦	耕地
3	111° 11' 19.3" E	41° 15' 38.3" N	1651	沙质	针茅草原	多年退耕地
4	111° 11' 19.3" E	41° 15' 38.3" N	1651	沙质	针茅草原	多年退耕地
5	110° 56' 07.4" E	41° 19' 16.4" N	1643	粘土	盐碱草	未利用地
6	110° 40' 35.9" E	41° 22' 03.0" N	1628	沙质	莜麦茬	耕地
7	110° 31' 58.4" E	41° 26' 46.1" N	1513	含砾沙质	———	耕地
8	110° 28' 39.2" E	41° 38' 57" N	1376	耕地	玉米地	耕地
9	110° 40' 37.5" E	41° 22' 06.4" N	1628	沙砾质	人工锦鸡儿	灌丛
10	110° 31' 58.4" E	41° 26' 46.1" N	1523	细沙	杂草、灌丛	人工林地
11	110° 31' 58.5" E	41° 26' 49.2" N	1516	沙质	杂草	未成林造林地
12	110° 28' 35.7" E	41° 39' 00.3" N	1379	含沙粘	冷蒿、针茅	退化林地
13	111° 32' 20.7" E	40° 56' 16.2" N	1601	含砾沙	山灌丛草原	草地
14	120° 21' 10.6" E	42° 43' 34.7" N	1372	含砾沙	冷蒿、针茅	草地
蒙古	105° 52' 39.3" E	47° 50' 36.7" N	1217	----	----	----
15	师大南,距呼和浩特降尘采样点 200 米					交通尘
16	师大西北,距呼和浩特降尘采样点 1000 米					交通尘
17	师大院内,距呼和浩特降尘采样点 50 米					建筑尘
18	师大家属区,距呼和浩特降尘采样点 1000 米					煤烟尘

采集附近建筑工地水泥沙灰堆积物样一个,代表建筑尘,样品中水泥含量约占 90%,其余部分主要是砂,样品性质主要体现呼和浩特市建筑工地普遍使用的水泥的

性质，基本也可体现建筑工地起尘的基本性质。源样记录见表 3—5，采样点位置图见图 3—1。



图 3—1 内蒙古采样点位置图

3.4 样品理化性质测定

3.4.1 降尘量测定及降尘强度计算

将定期采集的降尘样去杂，在实验室通风橱中风干后，用精度 0.0001g 的 FA2004N 型电子天平称重，并以此推算收集期内单位面积上的降尘量，结果见表 3-4。

3.4.2 沙尘暴降尘粒度测定及结果

将内蒙古师范大学和林盛乐校区采集的沙尘暴降尘样采用吸管法分三组测定降尘物机械组成，最后取平均值求得各粒径段质量百分比。其测定原理为：称取沙尘暴

降尘样品 50g 精确到 0. 1g, 将样品置于大三角瓶中加入 0. 5mol/l 六偏磷酸钠 40ml, 在电热板上加热沸腾 1 小时后用蒸馏水完全洗入 1000ml 量筒中, 并用蒸馏水定容到 1000ml。抽样按吸管法测定方法进行, 抽样深度为 8cm, 每次抽样量为 40ml。将抽取的液样置于小烧杯内加热蒸发到一定程度后在烘干箱内烘干, 最后取出冷却后, 在精度为 0. 0001g 的电子天平上称重, 减去烧杯重即为烧杯中干物质重, 用各次抽取所得干物质重, 通过计算可得相应粒径段上的质量百分含量, 结果见表 3—6。

表 3—6 盛乐校区一次降尘粒径分布

粒 级	0. 25-1	0. 05-	0. 01-	0. 005-	0. 002-	0. 001-	<0. 001
(mm)		0. 25	0. 05	0. 01	0. 005	0. 002	
含量 (%)	3. 47	63. 39	13. 22	2. 40	3. 09	2. 05	12. 38

3. 4. 3 样品比表面测定及结果

对 2006 年 3 月 9 日发生的沙尘暴, 以湿法和玻璃球法进行了收集。于内蒙古师范大学化学科学学院用美国 Micromeritics 公司生产的 ASAP2020 全自动快速比表面及孔隙度分析仪孔径比表面仪 (ASAP2020 Surface Area and Porosity Analyzer) 用“氮吸附法”测定样品的比表面。氮吸附法测定样品的比表面的基本原理: 固体表面的分子有较高的过剩自由能, 因此, 当气体分子碰撞到固体表面时便发生了吸附作用。根据吸附分子与固体表面的作用力的性质不同, 吸附可分为物理吸附和化学吸附。通常应用气体在固体表面的物理吸附来测定固体样品的比表面。在实验前先把样品摇匀, 每个样品作了六次实验。每次实验取样品 0.25g, 样品先加热到 95℃做预处理, 清除样品中的有机质和空气, 然后进行实验测定, 测定结果见表 3-7。

表 3-7 沙尘暴降尘比表面测定结果 (单位: m²/g)

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	平均值
湿 法	2.3136	3.7617	5.1361	3.2332	13.7793	5.6496	5.6456
玻璃球法	3.3229	4.2760	2.5184	3.5261	0.9511	0.9772	2.5953

3. 4. 4 降尘样品电镜扫描

将湿法和玻璃球法收集的 2006 年 3 月 9 日的沙尘暴样送于内蒙古农业大学实验分析中心, 用日本日立公司生产的 S-530 型扫描电子显微镜 (主要规格: 50nm; 放大倍数: 20-150000; 加速电压: 0. 8-25kv) 分别放大 150 倍、400 倍、600 倍观察它

们的粒度和形状。扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）测定样品的基本原理，用一束极细的电子束扫描样品，在样品表面激发出次级电子，次级电子的多少与电子束入射角有关，即与样品的表面结构有关，次级电子由探测体收集，并在那里被闪烁器转变为光信号，再经光电倍增管和放大器转变为电信号来控制荧光屏上电子束的强度，显示出与电子束同步的扫描图像。图像为立体形象，反映了样品的表面结构。为了使样品表面发射出次级电子，样品在固定、脱水后，要喷涂上一层重金属微粒，本实验采用了喷铂处理。电镜扫描结果见图 3—2、图 3—3：

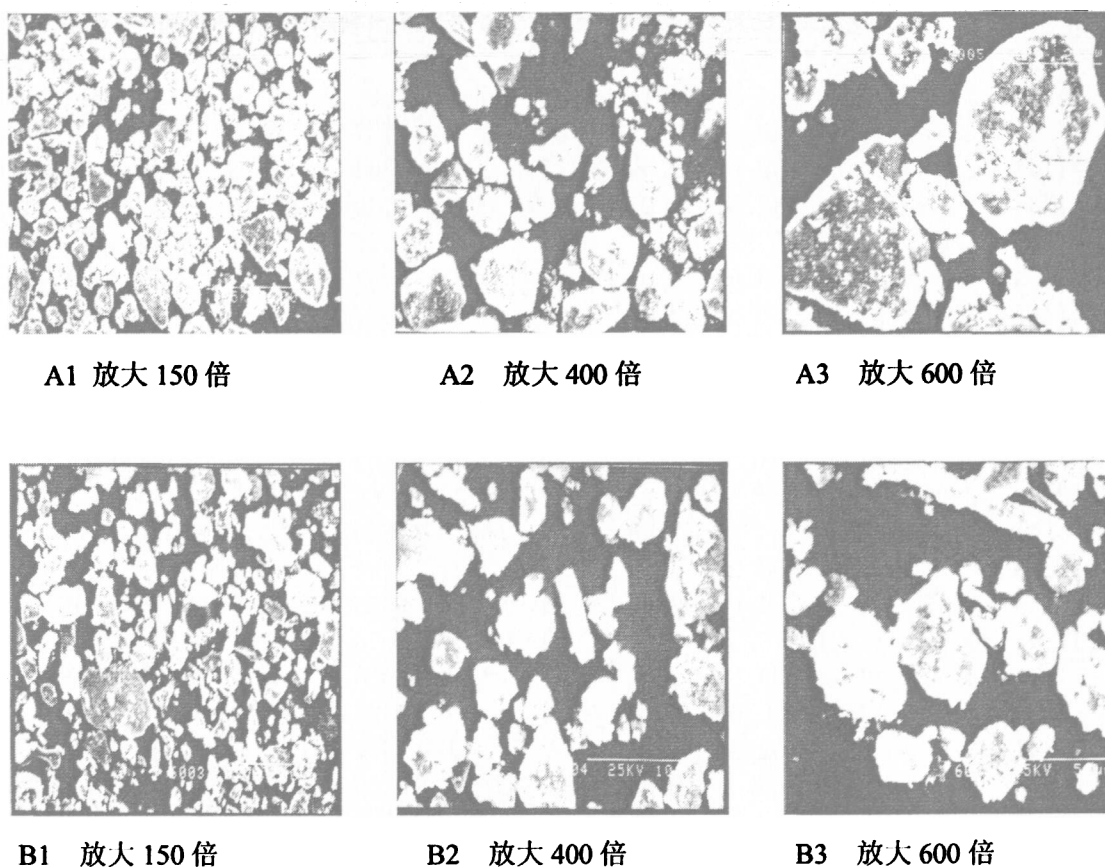


图 3—2 玻璃球法和湿法接收的降尘样品电镜扫描图像

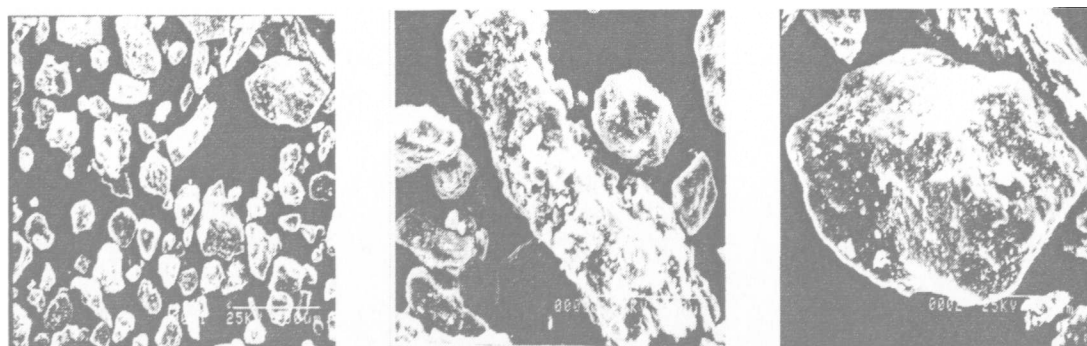


图 3—3 盛乐校区一次沙尘暴降尘电镜扫描图

3.4.5 样品化学成分测定

对所收集的大气降尘样进行分类处理后与尘源样品送内蒙古矿产实验研究所用日立 508 型原子吸收分光光度计进行了 K_2O 、 CaO 、 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Mn 、 Cu 、 Pb 、 As 、 Ti 等成分的质量百分含量测定。测定结果见表 3—8:

表 3—8 样品元素测定结果

样号	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Mn	Cu	Ti	As	Pb
单位	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$
A	1.95	2.60	12.67	51.51	2.14	6.39	5.40	630	35.6	3812	10.8	32.8
B	1.43	2.78	13.27	49.64	2.15	6.09	6.17	737	44.4	4168	12.1	46.0
C	1.44	2.59	14.05	49.53	2.09	4.77	6.63	764	56.4	4204	9.90	170.0
D	1.65	2.68	13.53	47.42	2.07	6.67	6.40	740	70.8	4223	12.8	149.0
E	1.61	2.64	12.43	53.26	2.17	5.67	5.54	677	34.1	3884	14.1	30.3
F	1.93	1.63	10.91	59.59	2.04	5.33	3.68	442	20.8	2955	11.0	22.1
G	1.47	2.45	13.11	50.00	2.03	5.99	5.77	687	45.8	4050	14.0	42.2
1	1.21	1.66	14.32	56.52	2.3	2.30	5.19	643	24.7	3717	12.3	26.4
2	1.19	1.65	14.22	56.00	2.34	2.33	5.25	657	23.8	3732	12.2	26.9
3	1.85	1.36	12.97	60.54	2.45	1.70	4.03	489	18.2	2483	11.8	24.1
4	1.95	1.3	13.01	61.35	2.55	1.74	3.39	469	16.8	2455	12.6	22.7
5	2.39	3.39	12.69	54.85	2.52	3.58	5.87	568	32.7	3286	16.8	16.6
6	1.44	1.84	12.89	54.35	2.06	4.58	5.18	680	25.3	3402	12.9	21.8
7	1.80	1.29	12.09	58.90	2.24	3.29	3.51	434	16.1	2652	11.5	21.8
8	1.45	2.12	13.18	54.01	2.40	4.44	5.18	656	29.7	3346	15.6	22.1
9	1.51	1.83	12.21	53.42	2.02	5.54	5.57	670	26.0	3186	13.2	21.1
10	1.75	1.43	12.44	59.95	2.40	2.35	3.72	450	17.9	2528	10.2	22.4
11	1.77	1.35	12.24	60.63	2.28	2.38	3.59	431	17.3	2849	10.6	21.6
12	1.43	2.02	12.64	52.97	2.41	5.57	4.84	607	27.4	3188	12.6	24.5
13	1.49	2.12	14.17	55.44	2.64	1.53	7.35	760	31.2	4456	11.7	25.9
14	1.62	1.77	13.18	59.75	2.54	1.76	4.82	664	23.3	3496	12.3	26.3
15	2.23	2.29	11.00	44.67	1.90	8.96	5.17	515	54.6	3392	6.30	46.1
16	2.13	2.20	11.54	48.15	1.98	7.74	5.32	529	30.9	3781	10.0	32.5
17	1.55	2.63	12.31	23.72	0.66	30.37	1.99	862	27.0	7028	13.5	26.8
18	1.01	1.14	23.94	36.22	0.70	5.52	5.19	570	83.4	6553	91.8	343.0
蒙古	2.48	0.64	10.93	63.71	1.8	1.52	2.9	356	9.1	3605	8.7	17.1

4. 实验结果分析

4.1 降尘性质分析

4.1.1 降尘强度分析

降尘样收集记录见表 3-3 与表 3-4:

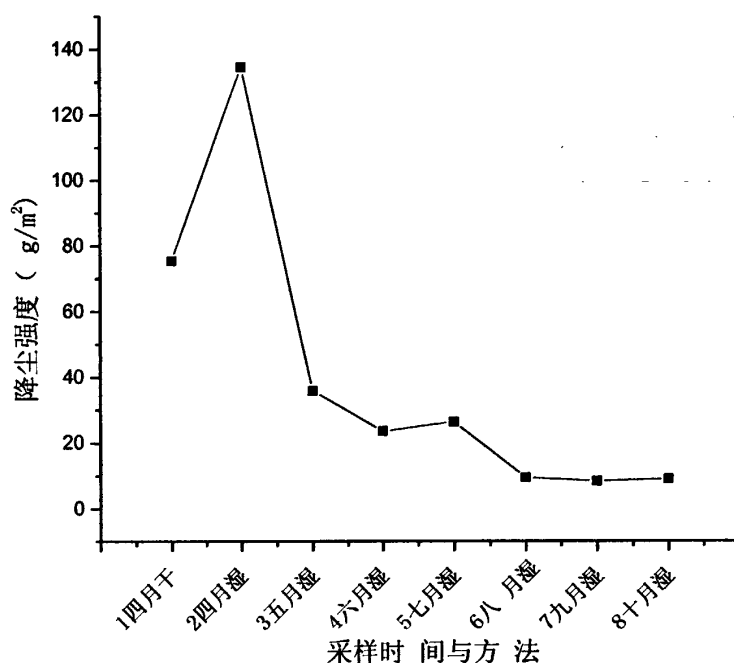


图 4—1 呼和浩特市采样点各月降尘强度图

从图 4—1 可以看出,呼和浩特市大气降尘集中在春季,尤其以大风降尘量为最大,在收集过程中,2006 年 4 月 16 日一天的沙尘暴降尘强度即接近 $140\text{g}/\text{m}^2$,远大于夏秋冬三季中任一月的月降尘强度。七月份降尘强度较大的原因是出现了几次大风天气,从而使该月降尘量偏大。从曲线上也可以看到,同是四月份降尘,由于受收集方法的影响,玻璃球法的收集效率小于湿法收集效率,约为湿法收集效率的 56.13%。这与前人研究的结论“玻璃球法的集尘效率为湿法的 77%,两种方法的集尘量之间具有良好的线性关系,依此可以进行数据的转换”^[103]有较大出入。在大风天较多的情况下,玻璃球法的集尘效率偏低,这可能受大风起尘强度的影响,当风力较强时增大了玻璃球法集尘器的二次起尘量,从而导致集尘量偏少,所集降尘粒度也将向难起尘方向集中。

4.1.2 和林盛乐校区尘暴降尘粒度特征分析

根据机械组成实验测定结果，将各粒径段的质量百分含量做曲线图 4—2 分析。

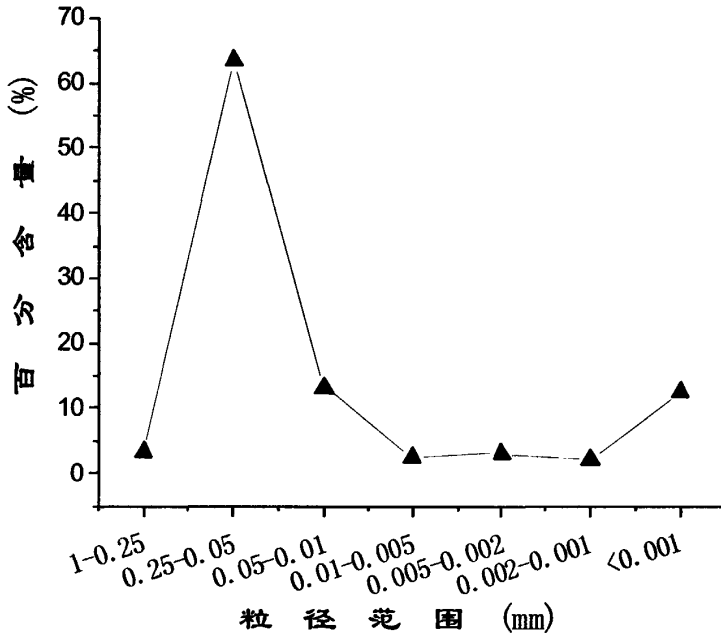


图 4—2 一次尘暴降尘各粒径段质量百分含量

将被测降尘物粒径从 1mm 到 0.001mm 分为 1-0.25mm、0.25-0.05mm、0.05-0.01mm、0.01-0.005mm、0.005-0.002mm、0.002-0.001mm、<0.001mm 七个粒径段，见表 3-6。

本次尘暴降尘物的粒级组成的峰值出现在 0.25-0.05mm 之间，相对含量占 63.39% (见图 1)。在 <0.001mm 处出现了一个次级峰值，相对含量占 12.38%。本次降尘粒径中 80.08% 集中在 1-0.01mm，其中 1-0.25mm 粒径段占 3.47%，0.25-0.05mm 粒径段占 63.39%，0.05-0.01mm 粒径段占 13.22%。粒径 <0.001mm 的物质占 12.38%，两者相加占到总量的 92.46%。粒径在 0.01-0.001mm 之间的物质仅占 7.54%，其中 0.01-0.005mm 粒径段占 2.40%，0.005-0.002mm 粒径段占 3.09%，0.002-0.001mm 粒径段占 2.05%。因此，本次降尘物粒径集中于 0.25-0.05mm 粒径段，该段物质占整个采集样品的 63.39%，其它各粒径段的总和为 36.61%。

本次降尘粒度间于 1-0.05mm 的细砂占 66.86%，<0.001mm 的粘粒占 12.38%，

0.05–0.01mm 的粉粒占 13.22%，据我国土壤质地分类标准，本次沉降物的质地属细砂土，结构序列偏沙。这与采样区靠近沙尘源区，大风吹蚀易蚀的粗大颗粒并就地降落有关。

一般认为，沙尘暴包含有大量的细粒子，尘降物多为粉粒和粘粒^[104]。本次降尘粒径<0.005 的粘粒占 17.51%，粒径间于 0.05–0.01mm 的粉粒占 13.22%，粒径间于 0.01–0.005mm 的占 2.40%，粒径<0.05mm 的细粒物质的相对含量占 33.13%，而粒径>0.05mm 的粗粒物质的相对含量占 66.87%。显然，细粒径物质含量偏低。

据研究，产生沙尘的地表物质以粉尘为主，其颗粒直径多在 0.063–0.002mm 之间^[104]。本次采样降尘物的粒径从 1mm 到<0.001mm 之间都有分布。并且粒径处于 1–0.05mm 的降尘物占整个采集样品的 66.86%，另外粒径<0.002mm 的降尘物占 14.43%，使得该区的尘暴降尘物粒径范围变广。

粒径间于 0.05–0.005mm 的物质通常被认为是沙尘暴主要的降尘物，但是此次间于这一粒径的物质其相对含量仅占 15.62%。此次尘暴降尘物的峰值粒径间于 0.25–0.05mm 粒径段，相对含量占 63.39%。因此，此次主要降尘物的粒径与通常相比有所偏离。另据同一收集地点不同时期（2006 年 3 月）收集的沙尘暴降尘做电镜扫描分析得出，沙尘暴降尘粒径集中分布在 0.013 mm—0.038 mm 段^[105]。这也说明沙尘暴降尘受风力、大风历时、沙源状况多种因素影响，同一地区的沙尘暴降尘其粒径变化较大。

4.1.3 降尘比表面分析

比表面测定结果见表 3—6。由比表面的测量结果可看出，湿法收集降尘的比表面偏大，玻璃球法收集降尘的比表面偏小。进而也可推断出，湿法收集降尘中粒径小的颗粒所占比例大于玻璃球法收集降尘中粒径小的颗粒所占比例。主要原因是湿法收集避免了降尘的“二次起尘”，而玻璃球法收集不能有效避免降尘的“二次起尘”，使所集降尘中粒径较细部分易吹失部分再次吹走。从测定结果可得出，降尘有较大的比表面，湿法收集条件下，比表面平均值为 $5.65\text{m}^2/\text{g}$ ，玻璃球法收集条件下，比表面平均值为 $2.60\text{m}^2/\text{g}$ 。较大的比表面使得大气尘埃有极强的表面吸附能，这种表面吸附能有助于大气中飘尘的聚集沉降，也促进了大气中颗粒污染物的吸附沉降。

4.1.4 降尘电镜扫描分析

扫描电镜结果表明，湿法收集降尘的颗粒较小，粒径过渡均匀；玻璃球法收集的降尘颗粒较大，大颗粒上粘附有较小的颗粒，粒径差别较大；湿法接收的降尘中大颗粒所占的比例小于玻璃球法接收降尘中大颗粒所占的比例。直观结果与通过比表面间

接分析结果一致。电镜扫描显示结果除了与两种收集过程中不同的“二次起尘”强度有关外,还因湿法接收的降尘中有一部分溶解,团聚的大颗粒分解为较小的颗粒,而用玻璃球法接收的降尘没有这一过程。所以,玻璃球法收集降尘很好的反应了降尘的原始形态,但其缺陷在于降尘的粒径分布不能很好地反映真实情况,最好的收集方法应该是有一种能够很好避免二次起尘的玻璃球法集尘。

4.2 大气降尘与尘源关系分析

4.2.1 两种收集方法对成分测定的影响

表 4-1 玻璃球法与湿法收集四月非尘暴降尘成分及变异系数对照表(单位:%)

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Ti	SiO ₂	Mn	Cu	As	Pb
玻璃球法	1.95	2.60	12.67	2.14	6.39	5.40	0.38	51.51	0.063	0.0036	0.0011	0.0033
湿 法	1.43	2.78	13.27	2.15	6.09	6.17	0.42	49.64	0.074	0.0044	0.0012	0.0046
平均值	1.69	2.69	12.97	2.15	6.24	5.79	0.40	50.58	0.068	0.0040	0.0011	0.0039
标准差	0.26	0.09	0.30	0.005	0.15	0.39	0.02	0.94	0.005	0.0004	0.0001	0.0007
Cv(变异系数)	15.4	3.3	2.3	0.2	2.4	6.7	4.5	1.8	7.8	11.0	5.7	16.8

以四月非尘暴玻璃球法收集干样(A样)及湿法收集样(B样)对比分析,通过Cv(变异系数)=标准差/平均值计算,可以看出两种收集方法的降尘成分有一定差别,常量成分(氧化物部分)中以Na₂O的变异最大,可达15.4%,这与样品收集时钠盐结晶及采样控制有关,其次为Fe₂O₃,其变异系数为6.7%,其它常量成分的变异系数较小,其值在0.2%-3.3%之间。微量成分的变异系数略大,Ti为4.5%,Mn为7.8%,As为5.7%,Cu为11.0%,Pb为16.8%,测定结果整体还表现出玻璃球法收集样比湿法收集样的成分测定结果偏小。由于两种收集方法对成分测定结果产生了一定影响,所以在后文的分析中涉及到成分分析内容时为了避免扩大误差,统一采用了样品完整的湿法收集样,因玻璃球法收集样品连续性较差,做为参照对比分析

4.2.2 呼和浩特市大气降尘元素特征

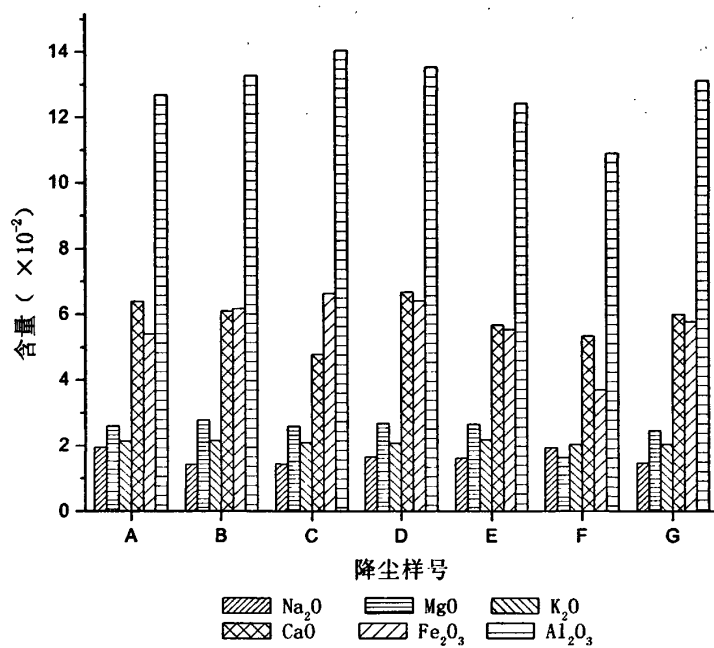


图 4—3 呼和浩特市大气降尘部分氧化物含量图

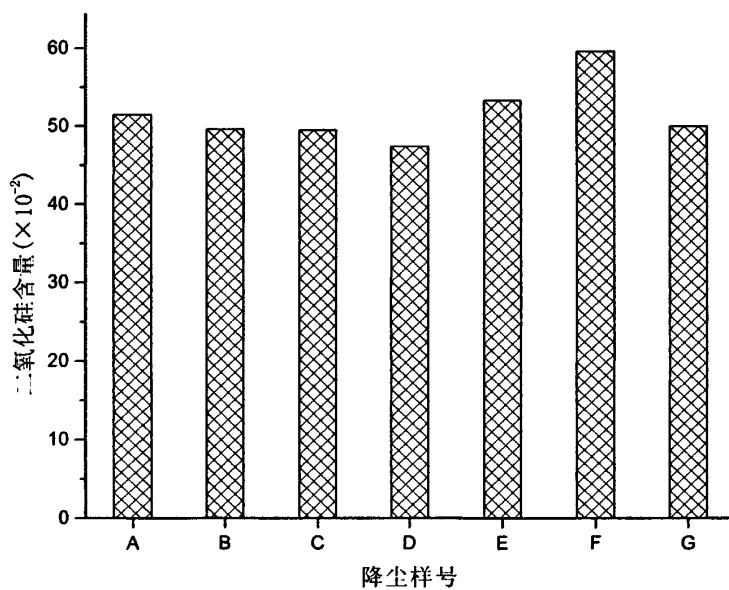


图 4—4 呼和浩特市大气降尘二氧化硅含量图

从图 4-3 与图 4-4 可以看出, SiO_2 是各个降尘样的最主要成分, 其质量百分含量

在 50%左右。其次 Al_2O_3 的含量最多, 质量百分含量在 11%-14%之间。 CaO 与 Fe_2O_3 的含量相差不大, 其质量百分含量约为 5%-7%, 盛乐校区三月沙尘暴降尘(F 样) Fe_2O_3 的含量略低些, 为 3.68%。 Na_2O 、 MgO 、 K_2O 的含量较低, 在 1.4%- 3.0%之间。几种氧化物的质量总分数在 73.23%-85.29%间。 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 这三种成分为降尘的最主要成分, 呼和浩特市非尘暴降尘中 (B+C+D 均) 三者和为 68.88%, 沙尘暴降尘中 (E+G 均) 三者和为 70.06%。由于 Al、Fe、Si 在暖湿气候条件下相对富集, 而在干冷条件下相对含量则降低^[17], 从硅铝铁富集程度与前人研究成果^[106]对比上可以看出, 呼和浩特沙尘源区的环境状况要明显劣于哈尔滨沙尘源区, 与兰州沙尘源区环境相似, 略好于兰州沙尘源区环境。这种分布态势受从沿海向内陆的水热地域分异规律的控制, 也受局地地形因素影响。

对比呼和浩特尘暴降尘与非尘暴降尘发现有明显区别。在颜色上, 尘暴降尘为浅黄色, 而非尘暴降尘为黑褐色; 质地粗细有明显的手感差别, 尘暴降尘手感明显较粗, 而非尘暴降尘手感明显较细。在成分上也有一定差别, 以非尘暴降尘湿样 (B、C、D) 平均和沙尘暴湿样 (E、G) 平均做对比, 见表 4—2:

表 4—2 呼和浩特市沙尘暴降尘与非尘暴降尘成分对照表(单位:%)

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Mn	Cu	Ti	As	Pb
非尘暴平均	1.51	2.68	13.62	48.86	2.10	5.84	6.40	0.075	0.0057	0.42	0.0012	0.013
沙尘暴平均	1.54	2.55	12.77	51.63	2.10	5.83	5.66	0.068	0.0040	0.40	0.0014	0.004

从表 4—2 对比发现, 呼和浩特沙尘暴降尘与非尘暴降尘成分质量百分含量上个别成分相似, Na_2O 相差约 0.03%, K_2O 基本相似, CaO 相差 0.01%; 所测定其他大部分成分在相应数量级上有较大差异, SiO_2 相差最大, 非尘暴降尘比沙尘暴降尘小 2.77%, 非尘暴降尘的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Cu、Ti、Pb 的质量百分含量比沙尘暴降尘分别大 0.85%, 0.74%, 0.0017%, 0.02%, 0.009%; 非尘暴降尘 As 的质量百分含量比沙尘暴降尘小 0.0002%。

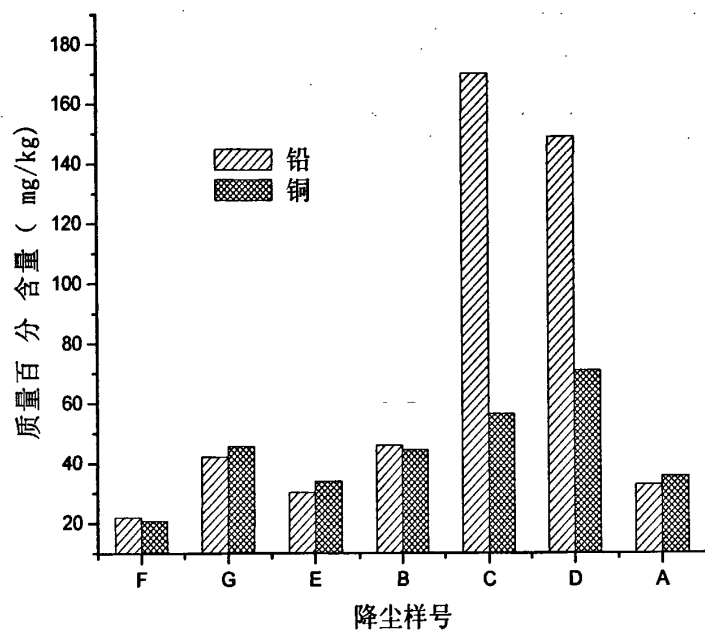


图 4—5 降尘铅、铜含量图

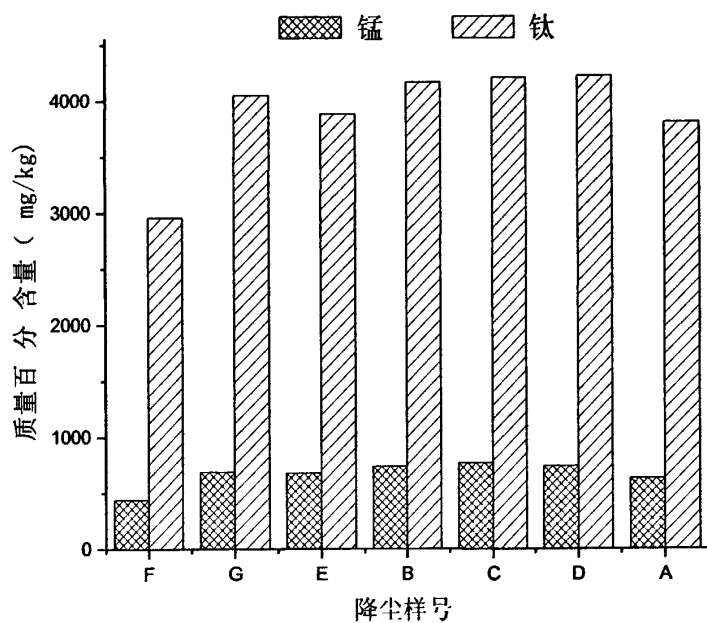


图 4—6 降尘锰、钛含量图

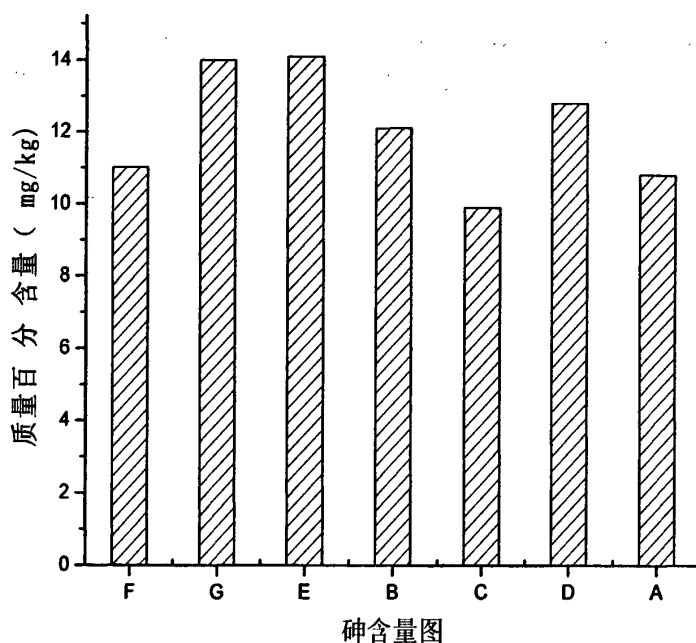


图 4—7 降尘砷含量图

对样品微量元素含量作图(图 4—5、图 4—6、图 4—7)分析。通过图 4—5 中 F 样(盛乐校区采)与 G 样(呼和浩特市采)对比可以看出,同是 3 月份沙尘暴降尘,盛乐校区采集降尘铅和铜的含量远小于呼和浩特市降尘的铅、铜含量,图 4—6 中,锰和钨的含量也有类似特征。E 样与 B 样是 4 月于师大收集的沙尘暴降尘和非尘暴降尘样,从这两个样品的铅、铜含量上看,有非尘暴降尘远高于尘暴降尘的特征,从 4 月玻璃球法收集非尘暴降尘(A 样)与 E 样对照中也发现有这一特征。三幅图中, A 样与 B 样对比可以发现,同一时期两种方法收集的样品,同一元素含量也会有较大差别。C 样与 D 样分别为 5 月、6 月于师大用湿法收集的非尘暴降尘,两个样品收集期间沙尘天气基本没有发生,此时大气中源于沙尘的成分极少,将此两样与其它各样对比发现铅铜含量远远高于其它各样。铅铜含量的这种变化特征一方面在一定程度上说明了其来源与人为源关系密切,另一方面也体现出了其含量受天气影响的明显性。图 4—6 中,钨钼的含量特征也是以 5 月与 6 月期间为最高,由于其含量相对较高,受天气变化的影响不是很明显,更为重要的是这两种元素的变化具有同步同相性,说明这两种元素很可能是同源的。从图 4—7 可以看出,As 含量体现出沙尘天气多发期间降尘中 As 含量较高的特征。

4.2.3 尘源元素特征

本实验尘源分析以阴山北麓表土为重点，同时选取呼和浩特市路尘、建筑尘、煤尘做了成分测定，其实验结果见表 3—8，经计算平均结果汇总得表 4—3：

表 4—3 四类尘源成分测定对照表（单位：%）

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Mn	Cu	Ti	As	Pb
表土	1.63	1.80	13.02	57.05	2.37	3.08	4.82	0.06	0.0024	0.32	0.0013	0.0023
路尘	2.18	2.245	11.27	46.41	1.94	8.35	5.25	0.05	0.0043	0.36	0.0008	0.0039
建筑尘	1.55	2.63	12.31	23.72	0.66	30.37	1.99	0.09	0.0027	0.70	0.0014	0.0027
煤尘	1.01	1.14	23.94	36.22	0.70	5.52	5.19	0.06	0.0083	0.66	0.0092	0.0343

表土的 SiO₂、K₂O 含量明显高于其他三类尘源，路尘的 Pb、Fe₂O₃ 含量明显较高，建筑尘的 CaO、Mn、Ti 含量较其他尘源高，尤其以 CaO 最为突出，煤尘的 Al₂O₃、Cu、As 含量较其他三类源高，尤其以 As 的含量远高于其他源样品为特征。

4.3 利用富集因子法及判别函数法进行大气降尘源分析

4.3.1 利用富集因子法进行源解析

富集因子法是大气降尘源解析过程中的一种定性方法，通过该方法能够定性了解大气污染物来源，与定量解析结合可起到相互验证的作用。将实验数据代入富集系数计算公式得表 4—4。

表 4—4 降尘微量元素富集系数计算结果

样号	EFSi	EFTi	EFMn	EFcu	EFAs	EFpb
A	1.094	0.737	0.600	0.699	6.074	3.382
B	1.006	0.769	0.670	0.833	6.498	4.529
C	0.948	0.733	0.656	0.100	5.021	15.808
D	0.943	0.765	0.660	1.302	6.742	14.388
E	1.153	0.765	0.657	0.683	8.084	3.185
F	1.469	0.663	0.489	0.474	7.186	2.646
G	1.026	0.757	0.632	0.870	7.610	4.205
均值	1.09	0.74	0.62	0.71	6.75	6.88

将富集系数计算结果成图分析。

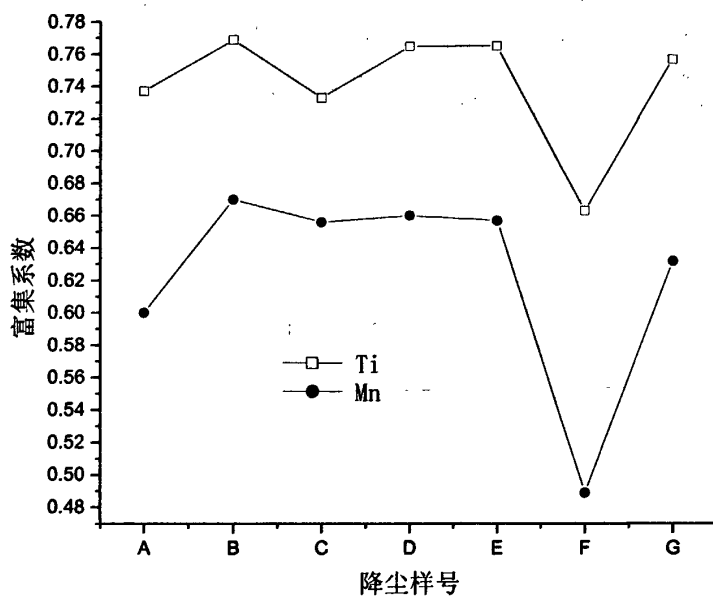


图 4—8 降尘锰、钛元素富集系数图

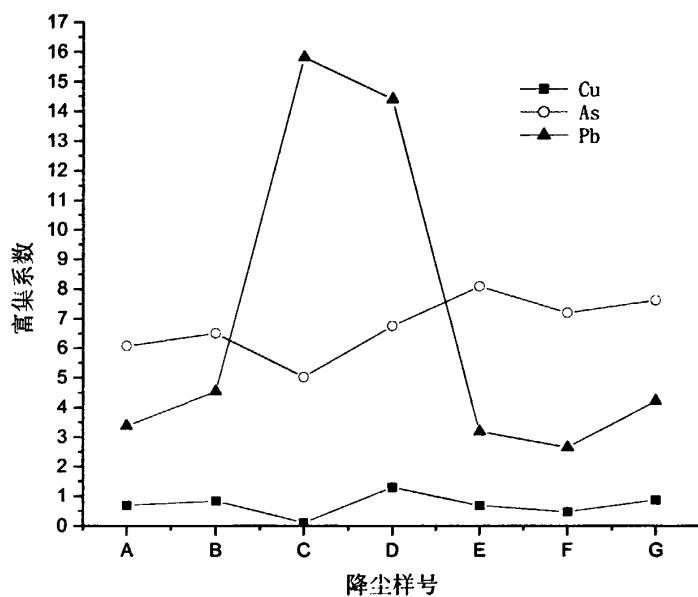


图 4—9 降尘钙、砷、铅元素富集系数图

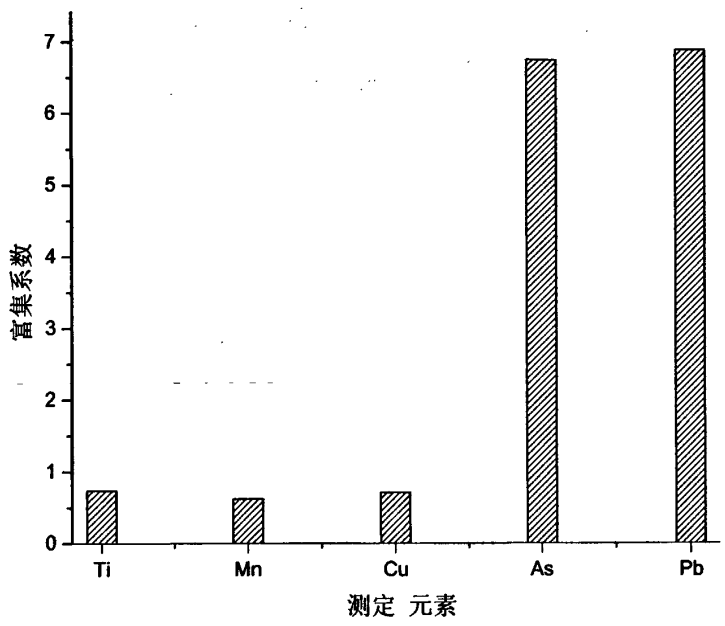


图4—10 降尘微量元素富集系数平均值

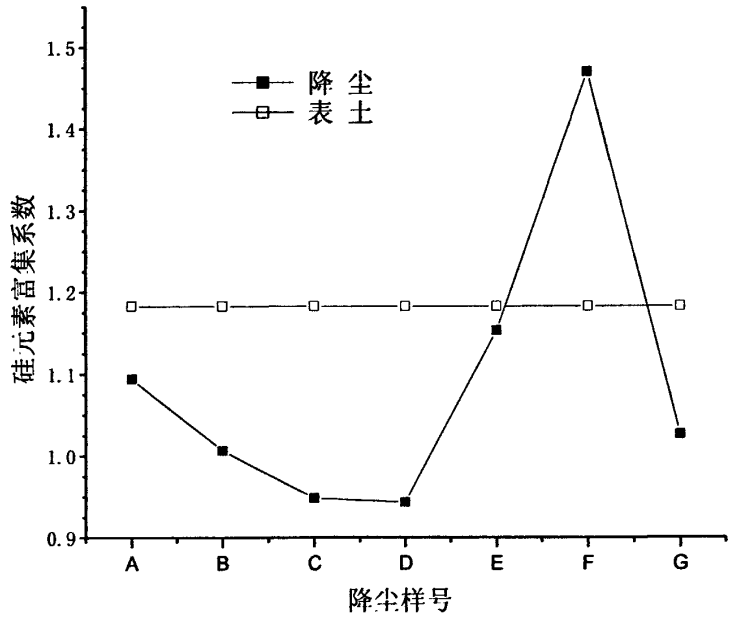


图4—11 呼和浩特大气降尘与阴山北麓表土硅元素富集系数图

在标识元素选定中已知 Ti、Mn 两种元素的主要来源是燃煤和土壤,从图 4—9 可以看出,两种元素含量变化具有同步性,说明二者很可能是同源的,两种元素的富集系数均小于 1,这两种元素在降尘中基本没有人为污染来源,可以断定 Ti、Mn 以土壤尘来源为主。Cu 元素主要来源是金属冶炼、垃圾焚烧、燃油、燃煤,在 D 样上出现了富集系数大于 1 的情况,D 样为六月于师大用湿法收集的非尘暴降尘,说明此时段降尘中人类社会活动污染的影响相对加重。但从图 4—9 中可看出 Cu 元素无明显富集现象,即该类人为污染源的影响并不严重。从图 4—10 可以看出,As 与 Pb 的富集系数均大于 1,说明呼和浩特的各类降尘中这两种元素均受到人为因素的影响,有人为污染源的存在。As 为煤的标识元素,尘暴降尘 As 含量远大于非尘暴降尘,经过与阴山北麓表土 As 含量比对发现,降尘 As 含量大于土壤表土 As 含量,说明呼和浩特市发生沙尘暴时,在阴山北麓表土尘源物质运移路径上有较大规模的煤尘物质参与,这与离呼和浩特市不远处沿交通干线分布的大规模煤场有极大关系,煤场在装运及选煤过程中造成大量煤尘飞扬,随大风进入市区,从而加重了市区沙尘暴降尘的 As 含量,非尘暴期间的 As 含量较高与呼和浩特市燃煤活动有关。Pb 为汽车尾气的标识元素,各个时期降尘的 Pb 富集系数均反应出有较高值,说明呼和浩特市机动车辆尾气排放较为严重,尤其在无大风沙尘天气发生时,大气降尘中的 Pb 污染更为严重,图 4—9 也可见,其富集系数在 14 以上,这一结果表明,呼和浩特市机动车辆交通尾气污染已成为一个严重的待治理项目。Si 元素的主要来源是土壤与燃煤,从图 4—11 可看出沙尘暴期间(降尘 E、F、G 样)降尘的 Si 元素富集系数普遍大于 1,且与阴山北麓表土 Si 元素富集系数接近,而在非尘暴期间其富集系数普遍偏小,说明 Si 元素的主要来源是土壤。

4.3.2 降尘与尘源判别函数分析

在沉积物物源判别中,常用判别函数 DF 值来判断待判采样点沉积物与某一标准端元沉积物(来源沉积物)的接近或相似程度¹⁰⁶。本文选择沉积物元素与 Al 的比值来计算。

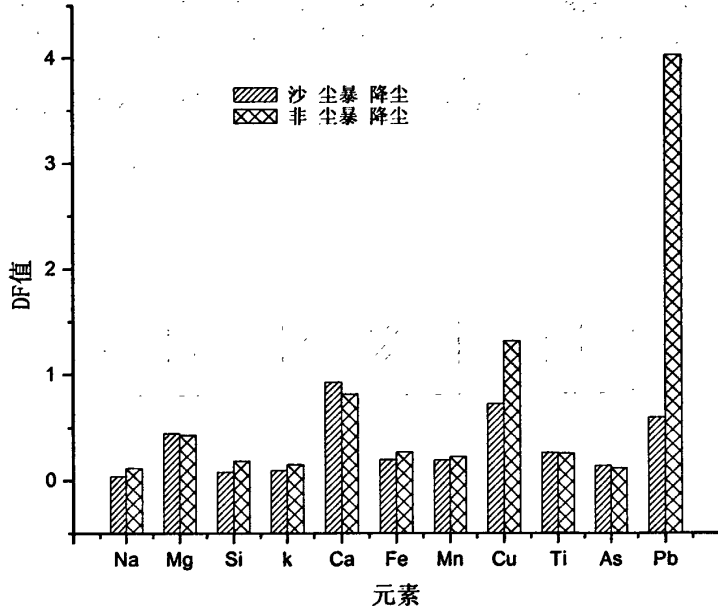


图 4—12 呼和浩特市降尘与阴山北麓表土判别函数 (DF 值)

从图 4—12 可以看出, 呼和浩特沙尘暴降尘与阴山北麓表土元素之间的 DF 值普遍较非沙尘暴降尘与阴山北麓表土元素之间的 DF 值小, 且大部分元素间的 DF 值小于 0.5。说明阴山北麓表土与呼和浩特大气降尘的关联性很好, 而且体现出与沙尘暴降尘的关联性比与非沙尘暴降尘的关联性更好的特点。Ca、Cu、Pb 三种元素的 DF 值大于 0.5, 这与市区较强的人为污染源有关系。沙尘暴降尘比非沙尘暴降尘 Ca 元素的 DF 值大, 而 Cu、Pb 元素的 DF 值小, 主要原因是沙尘暴期间风力较大, 大规模的颗粒较大的建筑工地尘受到吹扬后发生近距离沉降, 在风力较小时它的起尘强度偏小。在大风天气下, 较细小的冶金尘 Cu 与汽车尾气尘 Pb 受到风力吹扬, 不及在风力较小时的沉降强度, 但仍然是城区降尘的重要污染源。将收集的各种降尘样品元素测定结果再分别与道路尘、建筑尘、煤烟尘及蒙古国沙地表土样元素测定结果作判别函数 DF 值计算得表 4—5:

表 4—5 降尘与各类尘源判别函数 (DF 值) 计算结果

	Mn	Cu	Ti	As	Pb	Na	Mg	Si	k	Ca	Fe
B与道路尘	0.20	0.12	0.01	0.26	0.01	0.44	0.05	0.09	0.06	0.38	0.01
B与建筑尘	0.21	0.53	0.45	0.17	0.59	0.14	0.02	0.94	2.02	0.81	1.88
B与煤烟尘	1.33	0.04	0.15	0.76	1.42	1.55	3.40	1.47	4.54	0.99	1.14

B与蒙古尘	0.71	3.02	0.05	0.15	1.22	0.16	2.58	0.36	0.02	2.30	0.75
C与道路尘	0.17	0.06	0.06	0.03	2.47	0.47	0.07	0.14	0.14	0.54	0.01
C与建筑尘	0.22	0.83	0.48	0.36	4.56	0.19	0.14	0.83	1.78	0.86	1.92
C与煤烟尘	1.28	0.15	0.09	0.82	7.45	1.43	2.87	1.33	4.09	0.47	1.18
C与蒙古尘	0.67	3.82	0.09	0.12	6.73	0.20	2.15	0.40	0.10	1.44	0.78
D与道路尘	0.18	0.38	0.02	0.31	2.16	0.37	0.01	0.15	0.11	0.33	0.02
D与建筑尘	0.22	1.39	0.45	0.14	4.06	0.03	0.07	0.82	1.85	0.80	1.93
D与煤烟尘	1.30	0.50	0.14	0.75	6.69	1.89	3.16	1.32	4.23	1.14	1.18
D与蒙古尘	0.68	5.29	0.05	0.19	6.04	0.05	2.38	0.40	0.07	2.54	0.78
E与道路尘	0.18	0.28	0.02	0.57	0.30	0.33	0.07	0.04	0.01	0.38	0.04
E与建筑尘	0.22	0.25	0.45	0.03	0.12	0.03	0.01	1.22	2.26	0.82	1.76
E与煤烟尘	1.29	0.21	0.14	0.70	0.70	2.07	3.46	1.83	4.98	0.98	1.06
E与蒙古尘	0.67	2.30	0.05	0.43	0.56	0.01	2.63	0.26	0.06	2.28	0.68
F与道路尘	0.13	0.50	0.15	0.39	0.42	0.09	0.25	0.33	0.09	0.34	0.28
F与建筑尘	0.42	0.13	0.53	0.08	0.07	0.40	0.30	1.83	2.49	0.80	1.09
F与煤烟尘	0.70	0.45	0.01	0.74	0.41	3.19	2.14	2.61	5.39	1.12	0.56
F与蒙古尘	0.24	1.29	0.18	0.27	0.29	0.38	1.56	0.06	0.14	2.51	0.27
G与道路尘	0.13	0.08	0.02	0.48	0.08	0.42	0.06	0.07	0.10	0.38	0.05
G与建筑尘	0.25	0.59	0.46	0.03	0.48	0.11	0.13	0.98	1.89	0.81	1.72
G与煤烟尘	1.20	0.01	0.13	0.72	1.25	1.66	2.92	1.52	4.30	0.98	1.03
G与蒙古表土	0.61	3.20	0.06	0.34	1.06	0.13	2.19	0.35	0.06	2.29	0.66

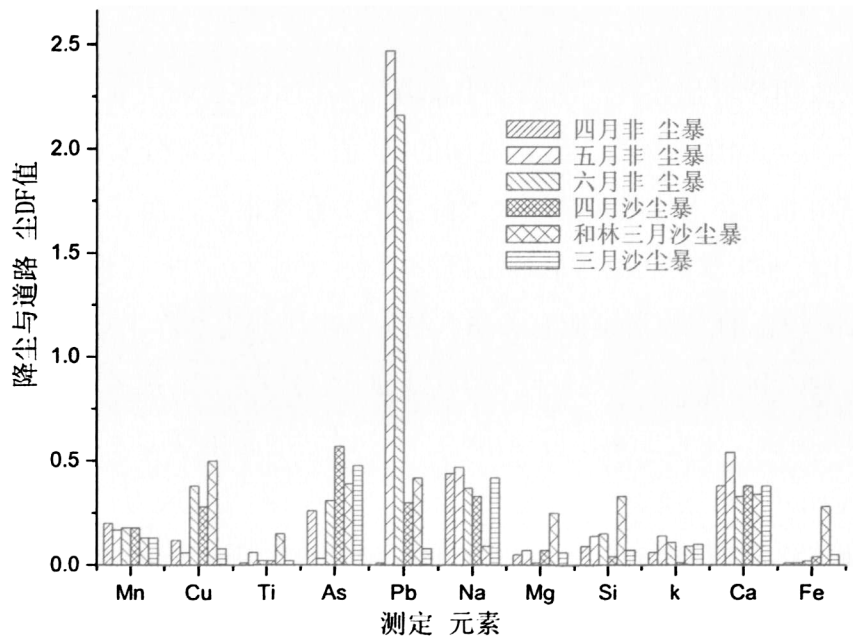


图 4—13 降尘与道路尘判别函数图

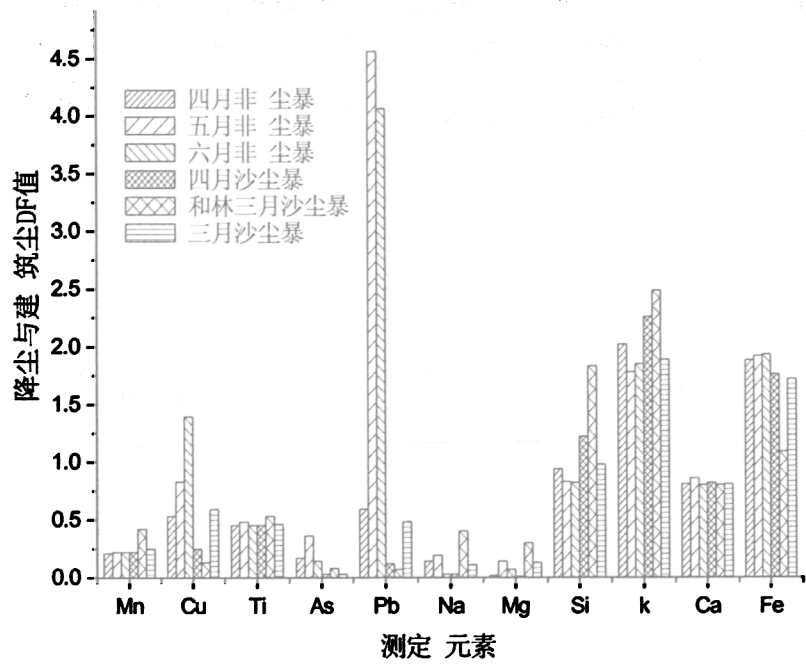


图 4—14 降尘与建筑尘判别函数图

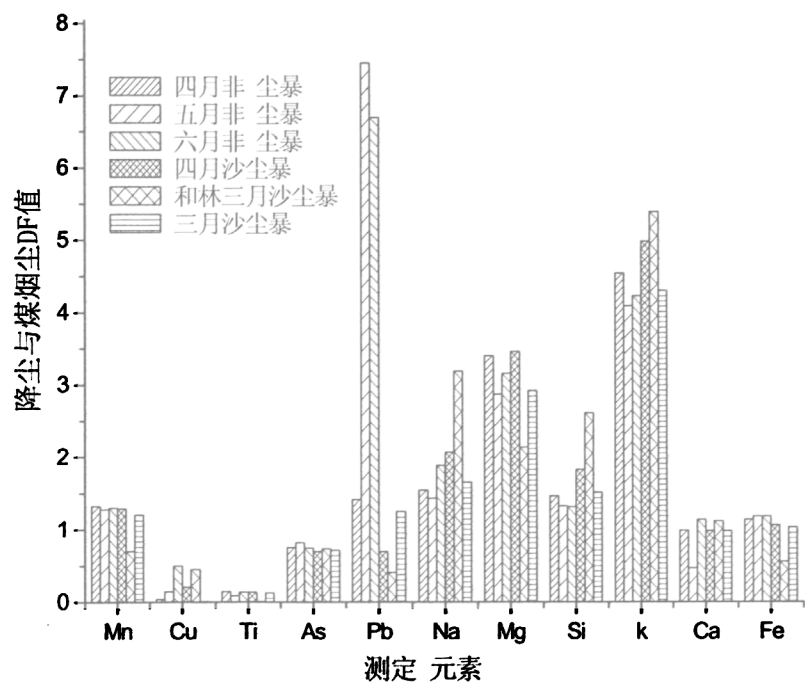


图 4—15 降尘与煤烟尘判别函数图

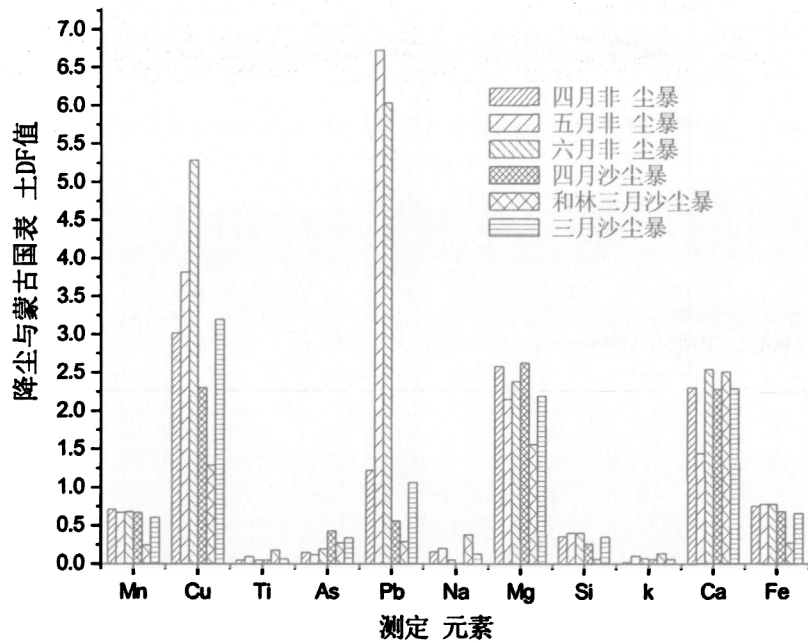


图 4—16 降尘与蒙古国表土判别函数图

从表 4—3 及图 4—13 到图 4—16 分析可知,道路尘与降尘的性质有较大相似性,DF 值普遍表现为小于 0.5,仅在五月与六月的非尘暴降尘上表现出 Pb 元素的 DF 值远大于 1 的现象,说明道路尘与呼和浩特大气降尘有很强的关联性。与煤烟尘、建筑尘、蒙古国表土尘源的判别函数均体现出 DF 值普遍大于 0.5 的特征,说明呼和浩特大气降尘与这三类尘源的同源性较差,但这三类尘源对呼和浩特大气降尘仍起不可排除的影响作用,只是在影响强度上较弱而已。图 4—16 中反映出呼和浩特大气降尘与蒙古国表土的判别函数关系,Ti、As、Na、Si、K 五种地壳元素表现出了较好的关联性,而其它六种元素的关联性很差,这可以说明呼和浩特大气降尘与蒙古国表土有弱的关联性,即蒙古国表土在一定的大气环流形势下可能会对呼和浩特大气降尘有一定贡献,但作用不是很强。总之,呼和浩特市大气降尘尘源物质主要以附近的阴山北麓表土及市区道路尘为主,在主尘源物质传输过程中加合了输移路径上的其他一些飞扬物。

5. 结论

论文通过对呼和浩特市春夏期间大气降尘的研究,对呼和浩特市大气降尘在不同的采样条件下的物理、化学性质有了较详细的了解,对大气降尘来源有了一定程度的认识。具体结论包括以下几个方面:

呼和浩特市大气降尘集中在春季,尤其以沙尘暴降尘量为最大。2006 年春季四月一次沙尘暴降尘其强度可达 $134.54\text{g}/\text{m}^2$ 。在降尘量研究过程中,发现由于受收集方法的影响,玻璃球法的收集效率小于湿法收集效率,约为湿法收集效率的 56.13%。

呼和浩特市的尘暴降尘具有粒径范围大,且受发生条件的影响,降尘粒度分布稳定性差的特征。两次沙尘暴降尘粒径峰值分别出现在 $0.25\text{--}0.05\text{mm}$ 之间和 $0.013\text{--}0.038\text{mm}$ 之间。

降尘有较大的比表面,湿法收集条件下,比表面平均值为 $5.65\text{m}^2/\text{g}$,玻璃球法收集条件下,比表面平均值为 $2.60\text{m}^2/\text{g}$ 。较大的比表面使得大气尘埃有极强的表面吸附能,这种表面吸附能有助于大气中飘尘的聚集沉降,也促进了大气中颗粒污染物的吸附沉降。

电镜扫描图显示,湿法收集降尘的颗粒较小,粒径过渡均匀;玻璃球法收集的降尘颗粒较大,大颗粒上粘附有较小的颗粒,粒径差别较大;湿法接收的降尘中大颗粒所占的比例小于玻璃球法接收降尘中大颗粒所占的比例。图像直观结果与通过比表面间接分析结果一致。

呼和浩特尘暴降尘与非尘暴降尘理化特征有明显区别。尘暴降尘为浅黄色,而非尘暴降尘为黑褐色;尘暴降尘手感明显较粗,而非尘暴降尘手感明显较细。

降尘收集方法对化学成分测定结果有一定影响,以四月非尘暴玻璃球法收集干样及湿法收集样对比分析,常量成分(氧化物部分)中以 Na_2O 的变异最大,其变异系数可达 15.4%,其次 Fe_2O_3 的变异系数为 6.7%,其它常量成分的变异系数较小,其值在 0.2%–3.3%之间。微量成分的变异系数略大, Ti 为 4.5%, Mn 为 7.8%, As 为 5.7%, Cu 为 11.0%, Pb 为 16.8%, 整体表现出玻璃球法收集样比湿法收集样的成分测定结果偏小。

SiO_2 是各个降尘样的最主要成分,其质量百分含量在 50%左右。其次 Al_2O_3 的含量最多,质量百分含量在 11%–14%之间。 CaO 与 Fe_2O_3 的含量相差不大,其质量百分含量约为 5%–7%。 Na_2O 、 MgO 、 K_2O 的含量较低,在 1.4%–3.0%之间。几种氧化物的质量总分数在 73.23%–85.29%间。 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 这三种成分为降尘的最主要成分。

呼和浩特沙尘暴降尘与非尘暴降尘化学成分相似性较差, Na_2O 相差 0.03%左右,

K₂O 基本相似, CaO 相差 0.01%; 所测定其他大部分成分在相应数量级上有较大差异, SiO₂ 相差最大, 非尘暴降尘比沙尘暴降尘小 2.77%, 非尘暴降尘比沙尘暴降尘 Al₂O₃, Fe₂O₃, Cu, Ti, Pb 的质量百分含量分别大 0.85%, 0.74%, 0.0017%, 0.02%, 0.009%; 非尘暴降尘 As 的质量百分含量比沙尘暴降尘小 0.0002%。

和林师大盛乐校区采集降尘中铅和铜的含量远小于呼和浩特市降尘的铅、铜含量。铅、铜含量有非尘暴降尘远高于尘暴降尘的特征。5、6 月份非尘暴降尘铅铜含量明显偏高。降尘中钛、锰含量也体现 5、6 月期间偏高的特征, 且受天气变化的影响不是很明显, As 含量体现出沙尘天气多发期间较高的特征。

呼和浩特大气降尘与阴山北麓表土的关联性很好。仅 Ca、Cu、Pb 三种元素的 DF 值大于 0.5, 这与市区较强的人为污染源有关系。尘暴降尘比非尘暴降尘 Ca 元素的 DF 值大, 而 Cu、Pb 元素的 DF 值小, 主要原因是尘暴期间风力较大, 大规模的颗粒较大的建筑工地尘受到吹扬后发生近距离沉降, 在风力较小时它的起尘强度小。在大风天气下, 较细小的冶金尘与汽车尾气尘受到风力吹扬, 不及在风力较小时的沉降强度, 但仍然是城区降尘的重要污染源。道路尘与降尘的 DF 值普遍小于 0.5, 仅在五月与六月的非尘暴降尘中表现出 Pb 元素的 DF 值远大于 1 的现象, 说明道路尘与呼和浩特大气降尘有很强的关联性。

降尘与煤烟尘、建筑尘、蒙古国表土尘源的判别函数均体现出 DF 值普遍大于 0.5 的特征, 说明呼和浩特大气降尘与这三类尘源的同源性较差, 但这三类尘源对呼和浩特大气降尘仍起不可排除的影响作用, 只是在影响强度上较弱, 远不及阴山北麓表土与呼和浩特道路尘对呼和浩特大气降尘的影响。从呼和浩特大气降尘与蒙古国表土的判别函数关系得出, Ti、As、Na、Si、K 五种地壳元素表现出了较好的关联性, 而其它六种元素的关联性很差, 这可以说明呼和浩特大气降尘与蒙古国北部表土有弱的关联性, 即蒙古国北部表土在一定的大气环流形势下可能会对呼和浩特大气降尘有一定贡献, 但作用不是很强。

富集系数法分析表明呼和浩特春夏期间大气降尘主要来源为表土, 其次受道路尘影响较为明显。

综合分析得出, 呼和浩特市大气降尘尘源物质以附近的阴山北麓表土及市区道路尘为主, 在主尘源物质传输过程中加合了输移路径上的其他一些飞扬物。

该研究有助于清楚认识大气降尘对呼和浩特市大气环境质量的影响, 摸清该区大气降尘的性质及来源, 有助于提高环境治理措施采取的有效性。受研究条件及实际工作的限制, 未能对源样品及降尘样品进行全程系统采集并做定量分析实为缺憾。

参考文献

- [1]哈斯. 城市效应对呼和浩特市气候的影响[J]. 气候与环境研究, 2000, 5 (2): 228-232.
- [2]白美兰. 呼和浩特城市发展对气候的影响[J]. 内蒙古气象, 1996 (4): 30-32.
- [3]宝玉. 简析呼和浩特市煤烟型大气污染变化[J]. 内蒙古科技与经济, 2005, 3-4.
- [4]张丽君. 呼和浩特市大气污染现状及防治途径[J]. 内蒙古环境保护, 1995, 7 (1): 3-5.
- [5]梁秀婷, 宋进华, 高春香, 鲍春林, 杨彩云. 呼和浩特市空气污染潜势预报研究[J]. 内蒙古气象, 2002, (2): 36-38.
- [6]包俊江, 邢世录. 呼和浩特市大气污染主要因子分析—灰色关联度法[J]. 内蒙古环境保护, 2004, 16 (4): 32-34.
- [7]邵冬海. 大连城市空气特征污染物 TSP 源解析及污染控制系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004:
- [8]齐文启, 孙宗光, 边归国. 环境监测新技术[M]. 北京, 化学工业出版社, 2003: 9.
- [9]韦洪莲. 中国城市大气颗粒物源解析研究及空气质量功能区达标现状及展望[EB/OL]. <http://www.cneac.com/article/printpage.asp?id=30>, 2004-4-5.]
- [10]陈志清, 朱震达. 从沙尘暴看西部大开发中生态环境保护的重要性[J]. 地理科学进展. 2000, 19 (3): 259-265.
- [11]胡金明, 崔海亭, 唐志尧. 中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J]. 自然灾害学报, 1999, 8 (4): 49-56.
- [12]孙冷, 黄朝迎. 西北地区沙尘暴引发的荒漠化问题[J]. 灾害学, 1997, 12 (3): 49-52.
- [13]杨东贞, 房秀梅, 李兴生. 我国北方沙尘暴变化趋势分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9 (3): 352-358.
- [14] Bagnold,R.A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes.Marrow & Company[J], New York.1941.
- [15]А. И. 兹纳门斯基著, 杨郁华译, 朱震达校. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题[M]. 北京: 科学出版社, 1960.
- [16]T.M.Zobeck. Soil properties affecting wind erosion[J].Soil and water Cons.,1991,46(2): 112-118.
- [17]D.W.Fryrear,C.A.Krammes, D.L.Williamson, T.M.Zobeck. Computing the wind erodible fraction of soils[J]. Soil and water Cons.,1994,49(2):183-188.
- [18]D.W.Fryrear.Mechanics,Measurement and modeling of wind erosion[J].Advances in Geo- Ecology 31(1998):291-300.
- [19]D.W.Fryrear,A.Saleh.Field wind erosion:Vertical distribution[J].Soil science,1993,155(4): 294-300.

- [20]Sherman,D. J .An equilibrium relationship for shear velocity and apparent roughness length in Aeolian saltation[J].Geomorphology,5(1992):419-431.
- [21]Blumberg,D.G,Greeley,R.Field studies of aerodynamic roughness length[J].Arid Environ.25(1993):39-48.
- [22]Hsu,S.A. Measurement of shear stress and roughness length on beach[J].Geophys.Res., 76(1971):2880-2885.
- [23]Chamberlain,A.C. Roughness length of sea,sand and snow[J]. Boundary Layer Meteorol., 25(1983):405-409.
- [24]刘景涛,郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J]. 高原气象, 2003, 22 (1): 51-64.
- [25]王式功,董光荣,陈惠忠,等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 349-356.
- [26]邱新法,曾燕,缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径. 地理学报, 2001, 56 (3): 316-322.
- [27]王炜,方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15 (3): 366-381.
- [28]范一大,史培军,王秀山,等. 中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J]. 地球科学进展, 2002, 17 (2): 289-294.
- [29]关欣,李巧云,文倩,等. 和田降尘与浮尘、扬沙、沙尘暴关系的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13 (6): 2-7.
- [30]袁中新,海春兴,赵明,刘乙琦,林志逢. 长距离传送过程中沙尘指纹特征辨识探讨[J]. 高原气象, 2006, 25 (增刊) 17-23.
- [31]Tegen Ina,A Lacus Andrew, Znez Fung. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils[J].Nature,1996. 380:419-422.
- [32]Winchester. J .W., LU Weixiu,REN Lixin,WANG Mingxing. Fine and coarse aerosol composition from a rural area in northern China[J].Atmospheric environment,1981.15.933-937.
- [33]张仁健,王明星,浦一芬,等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究. 2000, 5 (3): 259-266.
- [34]黄宁,郑晓静,陈广庭,等. 沙尘暴对无线电波传播影响的研究[J]. 中国沙漠, 1998, 18 (4): 350-353.
- [35]金昱,郭新彪,黄雪莲,等. 沙尘暴颗粒物对人肺成纤维细胞的细胞毒性研究[J]. 环境与健康杂志. 2004, 21 (4): 199-201.
- [36]全浩,乔世俊,魏群. 河西走廊 1994-04-08 浮尘暴 • 黄沙的气象特征和大气气溶胶测定[J]. 环

境科学, 1995, 16 (1): 54 -57.

[37] GUO Zhigang, LI J uyuan, FENG J ialiang, et al. Compound-specific carbon isotope compositions of individual long-chain n-alkanes in severe Asian dust episodes in the North China coast in 2002[J], Chinese Science Bulletin, 2006, 51(17): 2133-2140.

[38] T L Durlington et al. Analysis of PM₁₀ Trends in the United States from 1988 through 1995[J]. J AWMA, 1997, 47, Oct: 1070-1078.

[39] 杨东贞, 纪湘明, 徐晓斌, 等. 一次黄沙天气过程的分析[J]. 气象学报, 1991, 49 (3): 80-88.

[40] 任正昌, 李宏江. 大气降尘量的粗略观测[J]. 新疆气象, 1988, (9): 41-41.

[41] 何清. 浮尘天气及其评价[J]. 新疆气象, 1997, 20 (3): 23-25.

[42] 何清, 赵景峰. 塔里木盆地浮尘时空分布及对环境的影响研究[J]. 中国沙漠, 1997, 17 (2): 119-126.

[43] Iwasaka Y, H Minowra A, Nagaya K. Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles[J]. Tellus, 1983, 35B: 189-196.

[44] 李安春, 陈丽蓉, 王不诰, 等. 青岛地区一次浮尘过程的来源及向海输尘强度[J]. 科学通报, 1997, 42 (18): 1990-1992.

[45] 田中丰显. 云彩冰晶化过程と冰晶核[J]. 气象研究, 1974, 1 (122): 689-737.

[46] 瞿章, 许宝玉, 贺慧霞. “930505” 沙尘暴的若干启示[J]. 干旱区地理, 1994, 17 (10): 63-66.

[47] 王赞红. 现代尘暴降尘与非尘暴降尘的粒度特征[J]. 地理学报. 2003, 58 (4): 606-610.

[48] 叶笃正, 卞纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55 (5): 513-521.

[49] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠. 2004, 24 (5): 616-622.

[50] 张仁键, 王明星, 胡非, 等. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究[J]. 中国科学院研究生院学报. 2002, 19 (1): 75-81.

[51] Seinfeld J H. Atmospheric Chemistry And Physics: From air pollution to climate change. New York[J]. 1998, 700-703.

[52] Kim Y P, Moon Kil-Choo, Balk Nam-J un. Concentrations of Carbonaceous Species in Particles at Seoul and Che J u in Korea[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 2751-2758.

[53] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of Secondary organic aerosol episodes and quanti-

fyication of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS[J]. At mospheric Environment,1995,29:3527-3544.

[54]Chow J C,Watson J G,Lowenthal D H,etal.PM₁₀ and PM_{2.5}compositions in California's San Joaquin Valley[J].Aerosol Science Techonlogy,1993,18:105-128.

[55]李德成,王东红,彭安.北京西北郊降尘和降雨中稀土元素的浓度分布和来源的初步分析[J].环境科学学报,2001,21(5):640-642.

[56]张宁,牛耘.兰州市大气降尘沉积物的粒度分布特征研究[J].干旱环境监测,1998,12(1):16-19.

[57]端木合顺.西安市降尘粒度空间分布特征及环境意义[J].西安科技大学报,2005,25(2):160-163.

[58]樊恒文,肖洪浪,段争虎,等.中国沙漠地区降尘特征与影响因素分析[J].中国沙漠,2002,22(6):559-565.

[59]陈天虎,徐惠芳.大气降尘 TEM 观察及其环境矿物学意义[J].岩石矿物杂志,2003,(22)4:425-428.

[60]林国珍,黄芹,宿志一,等.大气降尘中水溶性有机物组成与含量的研究[J].环境科学进展,1998,7(5):145-151.

[61]陈天虎,冯军会,张宇,等.合肥市大气颗粒物组成及其环境指示意义.岩石矿物学杂志,2001,20(4):433-436.

[62]蔡若松.积分法在计算丹东市大气降尘上的运用[J].辽宁大学学报(自然科学版),2002,29(2):180-183.

[63]柯昌华,金文刚,钟秦.环境空气中大气颗粒物源解析的研究进展[J].重庆环境科学,2002,24(3):55-59.

[64]孟伟.大气主要污染源清单调查与源解析的研究—以山西源为例[D].南京:南京信息工程大学,2006:

[65]戴树桂,朱坦.受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展[J].中国环境科学.1995,15(4):252-256.

[66]张晶,陈宗良,王玮.北京市大气小颗粒物的污染源解析[J],环境科学学报,1998,18(1):62-68.

[67]陈明华,陈静森,李德.上海市大气颗粒物高浓度区污染物的源解析[J].上海环境科学,1997,16(10):15-18.

[68]黄世鸿,李如祥,等.常州市大气气溶胶颗粒来源解析[J],1995,15(2):92-101.

- [69]陈思龙, 郑有斌, 赵琦, 等. 重庆城区大气颗粒物污染来源解析[J], 重庆环境科学, 1996, 18 (6): 24-29.
- [70]朱建新. CMB 法应用及对乌鲁木齐大气 TSP 来源解析[J], 新疆环境保护, 1996, 18 (1): 29-37.
- [71]刘昌岭, 宋苏顷, 夏宁, 等. 青岛市区大气颗粒物中重金属的浓度及其来源研究[J], 青岛大学学报, 1998, 11 (3): 42-47.
- [72]刘咸德, 封跃鹏, 贾红, 等. 青岛市大气颗粒物来源的定量解析——化学质量平衡方法[J]. 环境科学研究, 1998, 11 (5): 51-56.
- [73]杨丽萍, 陈发虎, 张成君. 兰州市大气降尘的化学特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38 (5): 115-120.
- [74]客绍英, 马作东, 陈玉芹, 等. 中子活化分析在大气降尘监测中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16 (3): 56-59.
- [75]倪永年. 化学计量学在分析化学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [76]王帅杰, 朱坦. 大气颗粒物源解析技术研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3 (8): 8-12
- [77]张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 9.
- [78]顾卫, 蔡雪鹏, 李彭俊, 等. 内蒙古中西部地区沙尘暴日数分布的地貌特征[J]. 自然灾害学报. 2003, 12 (4): 131-136
- [79]顾卫, 蔡雪鹏, 谢锋. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨[J]. 地球科学进展. 200 2, 17 (2): 273-277.
- [80]高涛, 刘景涛, 康玲. 沙尘暴天气客观归类判别预报模式[J]. 甘肃气象. 2001, 19 (2): 14-20.
- [81]姜学恭, 沈建国, 刘景涛, 等. 导致一例强沙尘暴过程形成的若干天气因素的模拟研究[J]. 气象学报. 2003, 61 (5): 606-620.
- [82]邢世录, 李桂兰. 呼和浩特市城区大气环境容量模型研究[J]. 内蒙古环境保护, 2005, 17 (1): 24-27
- [83]尤莉, 宫德吉. 冬季呼市地面流场特点及成因分析[J]. 内蒙古气象, 2001, (3): 22-27.
- [84]高旺盛, 秦红灵, 赵沛义. 内蒙古阴山北麓干旱区不同种植模式对农田风蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12 (5): 122-125.
- [85]海春兴, 周心澄, 关文彬. 社会发展与科技进步对农牧交错带土地利用方式变化驱动研究综述[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2005, 4 (1): 69-72

- [86]海春兴, 赵明, 郝润梅, 等. 阴山北麓不同用地方式下春季土壤表层水分变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19 (5): 150-154.
- [87]其其格, 海春兴. 人口因素对农牧交错带农牧业生态环境的影响[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2005, 34 (2): 228-231.
- [88]Yuan,C.S., C.X.Hai and M.Zhao.Source Profiles and Fingerprints of Fine and Coarse Sands Resuspended from the Soils Sampled in the Central Inner Mongolia[J]. China Particuology,Vol.4, No.6,pp.304-311,2006, (CA) .
- [89]袁中新, 海春兴, 赵明, 刘乙琦, 林志逢. 长距离传送过程中沙尘指纹特征辨识探讨[J]. 高原气象, 2006, 25 (增刊) 17-23.
- [90]李占宏, 海春兴, 刘广通. 内蒙古土默特平原降尘特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21 (1): 78-81.
- [91][http://www. people. com. cn/GB/huanbao/8220/35258/35316/2639437. html](http://www.people.com.cn/GB/huanbao/8220/35258/35316/2639437.html)
- [92]姚凤山. 呼和浩特市水资源的科学利用和保护[J]. 内蒙古科技与经济. 2002 (1): 37-38.
- [93]赵明主编. 呼和浩特市城市土地价格调查研究[M]. 内蒙古人民出版社. 2004: 1-6.
- [94]刘瑞平, 李明霄. 呼和浩特市岩土工程勘察信息系统研究[J]. 内蒙古石油化工, 2001, 27: 19-22.
- [95]邱海涛, 徐桂梅. 呼和浩特市低空逆温特征分析[J]. 内蒙古气象, 2003, (3): 25-26.
- [96]邸瑞琦. 呼和浩特城市气候特征初步分析[J]. 内蒙古气象, 1997, (2): 33-36.
- [97]关宇, 温志宏. 呼和浩特市可持续发展水资源战略[J]. 内蒙古水利, 2002, (3): 24-27.
- [98]赵连俊. 呼和浩特市行道树种规划的探讨[J]. 内蒙古林业科技, 2001 (增刊), 71\80.
- [99]宝音主编. 内蒙古城市化与城镇体系发展研究[M]. 内蒙古教育出版社. 2002, 4-13
- [100]田存旺, 李瑞芝. 呼和浩特地区地下水与植被建设[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10 (2): 95-101
- [101]Zobeck T.M.Soil properties affecting wind erosion. J ournal of soil and water conservation[J]. 1991, 46(2):112-118.
- [102]魏文春. 呼和浩特市优化能源结构初探[J]. 北方经济, 1999, (5): 41-43.
- [103]钱广强, 董治宝. 大气降尘收集方法及相关问题研究[J]. 中国沙漠, 2004, (24)6: 779-782.
- [104]叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 15 (4): 361-364.
- [105]张富. 呼和浩特大气降尘两种收集方法对粒度大小的影响[J]. 现代学术研究杂志, 2007, 37-39.

- [106]谢远云, 何葵, 周嘉, 等. 哈尔滨沙尘暴的化学特征及其物质源探讨[J]. 地理研究, 2006, 25 (2): 255-261.
- [107]殷汉琴. 铜陵市大气降尘源解析及其对土壤重金属累积的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006:

附录

研究生在读期间发表论文

1. 刘广通, 海春兴, 李占宏. 应用吸管法进行风沙土机械组成分析的实验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14 (2): 121-123、126.
2. 李占宏, 海春兴, 刘广通. 内蒙古土默特平原降尘特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 78-81.
3. Chun-xing Hai, Chun-shin Yuan, Guang-tong Liu , Xiao-jia Li, Fu Zhang, Xiu-jiang Zhang. Research on the Components of Dust Fall in Hohhot in Comparison with Surface Soil Components in Different Lands of Inner Mongolia Plateau[J]. Water Air Soil Pollut, 2007.
4. 袁晓宇, 海春兴, 刘广通. 阴山北麓不同用地土壤有机质含量对抗风蚀的作用研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 302-304.
5. 张富, 海春兴, 刘广通. 呼和浩特市大气降尘两种收集方法对粒度大小的影响[J]. 现代学术研究杂志, 2007, 2 (6): 37-39.
6. 李晓佳, 海春兴, 刘广通. 阴山北麓不同用地方式下春季土壤可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 926-932.
7. 娜日苏, 海春兴, 刘广通. 自然地理在高中地理教学中的作用与地位[J]. 内蒙古师范大学学报(教育科学版), 2008, 21(2): 122-124.
8. 欧阳玲, 刘广通, 包秀艳. 科尔沁沙地农牧交错区典型村域土地利用现状及动态变化分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 376-381.

致 谢

硕士研究生生活结束在即。回顾三年，多少师生与知识丰富了我的人生。在此，我要写下对他们的感谢，且永远记在我心中！

首先感谢我的导师海春兴教授对我三年乃至更多的培养！他以人格的魅力吸引我，他以渊博的知识和严谨的治学态度鞭策我，导师的言传身教将使我受益终生！感谢导师在我论文完成过程中一丝不苟的指导及大力资助！师恩难忘，难忘恩师！

感谢郝润梅老师、银山老师、包慧娟老师在我论文完成过程中所给予的指点并提出宝贵意见！也感谢内蒙古师范大学地理科学学院圆了我的硕士梦！

毕业论文撰写及采样与实验过程中，实验室的李占宏、杜鹏飞、娜日苏、李晓佳、袁晓宇、张富、张修江、郭佳、武月荣等同学给了我很大帮助，在此对他们表示衷心的感谢！

感谢我的家人和朋友们在我读书期间给予的生活中的帮助！

刘广通

2008年3月31日