

北京城市大气环境污染机理与调控原理

徐祥德 丁国安 卞林根

(中国气象科学研究院 北京 100081)

摘 要

该文主要介绍了科技部国家重点基础研究发展规划项目“首都北京及周边地区大气、水、土壤环境污染机理及调控原理”大气分项目的研究成果。项目分别于 2001 年和 2003 年重点开展了 BECAPEX 科学试验(Beijing City Air Pollution Experiment)。BECAPEX 试验同步进行城市边界层气象与大气化学观测,通过卫星遥感、地面观测,即城市空间和地面以及点与面结合的技术途径,以揭示北京城市污染“空气穹隆”大气化学结构特征及其变化规律,为城市环境大气动力-化学模式提供基本科学参数,给出城市边界层大气物理化学过程综合模型,为提高城市环境大气物理-化学过程耦合模式的准确性和可靠性提供科学依据。该项目揭示了北京城区和城近郊区城市边界层结构与湍流特征,城市大气污染垂直结构特征,发现了城市大气污染空间结构多尺度特征,其中包括大气污染源影响和城市热岛多尺度特征,揭示了城市大气重污染过程周边源影响域,以及北京及周边地区气溶胶影响域和区域气候响应,提出了北京市典型污染源排放清单,发展了城市气象模式系统,包括冠层模式、街谷环流和热力结构以及城市高大建筑群周围风环境数值模拟,发展了空气质量模式技术,包括二次气溶胶模拟试验、北京地区 SO_2 污染的长期模拟及不同类型排放源影响的计算与评估、影响北京地区的沙尘暴输送模拟、区域化学输送模式中 NO_x 和 O_3 源示踪法,城市尺度的大气污染 CAPPS 模式及统计模型的应用、大气污染及紫外辐射数值预报模式和 CMAQ-MOS 空气质量预报方法,改进了美国公共多尺度空气质量预报模式,建立了 CMAQ-MOS 区域空气质量动力-统计模型预报模式,以及发展的源同化技术,突破了当前空气质量模式技术“瓶颈”,使模式预报准确率明显提高。

关键词:大气污染;大气环境;科学试验;空气质量;动力-统计模型;数值模式

1 北京城市大气环境观测试验(BECAPEX)

科技部国家重点基础研究发展规划项目(简称 973 项目)首都北京及周边地区大气、水、土壤环境污染机理及调控原理“大气分项目执行时间为 1999 年 12 月—2005 年 10 月,项目首席科学家为徐祥德,周秀骥院士任科学总顾问。

项目组分别于 2001 年和 2003 年重点开展了冬、夏两季的北京城近郊区大气边界层动力和大气化学试验,并以此为主先后开展了 11 期阶段性现场观测试验,简称为 BECAPEX 科学试验(Beijing City Air Pollution Experiment)。为北京“蓝天碧水”工程实施提供重要观测数据,其试验重点是解决北京城市大气环境污染关键科学问题与技术难题。设计的观测试验可为城市环境大气动力-化学模式提供基本科学参数,给出城市边界层大气化学、物理过程综

合模型,为提高城市环境大气-化学过程耦合模式的准确性和可靠性提供观测依据。这项研究将进一步深化对北京及周边地区城市环境动力学理论与大气污染机理和调控原理的理论认识。

1.1 城市大气环境场观测试验总体设计

BECAPEX 试验同步进行城市边界层气象因子与大气化学观测,通过卫星遥感、地面观测,即点与面结合的技术途径,以揭示北京城市污染“空气穹隆”大气化学结构特征及其变化规律。BECAPEX 大气污染现场科学试验观测目标为北京城区大气污染边界层结构及其物理、化学过程。卞林根、丁国安等负责实施了北京城市边界层大气动力-化学三维结构特征现场试验综合观测网布局,在北京城郊南北剖面上的四环路的中国科学院遥感所、建国门古观象台、方庄小区、南郊大气探测基地、石景山区福田村(石景山北部)和朝阳金盏乡郁金香花园(朝阳东北方)6 个观测点,实施了对城市大气风向、风速、

1.2 气溶胶卫星遥感-地面观测变分分析可行性

城市气溶胶观测方法是亟待解决的关键技术,徐祥德、周秀骥等使用卫星遥感-地面观测变分技术追溯分析影响城市空气污染的周边源。研究发现冬季 TOMS 气溶胶光学厚度高值区域位于北京城区并向南延伸,且呈南北向带状分布,表明北京周边大地形“谷地”内冬季污染程度与南部周边城市群落的污染排放源密切相关,提出了地面多点动态光度计与 MODIS 卫星遥感气溶胶综合观测技术途径,并揭示了北京周边地区(河北、山东等省)气溶胶及其污染排放影响特征。这类气溶胶区域性影响特征与北京周边山谷南面开口的“马蹄型”地形相关。研究结果表明,采用卫星遥感-地面光度计变分处理技术,可以为北京及周边地区气溶胶分布及周边排放源影响的监测系统提供新的思路以及技术处理新途径。利用 MODIS 资料进行的高分辨率反演得到的年平均结果证实气溶胶光学厚度在北京市区的高值区基本分布在人口密集、交通和工商业活动频繁的地区,预示高分辨率卫星遥感结果将对颗粒物污染物的排放源分布监测具有潜在的应用价值^[9-12]。

1.3 城市大气污染站点资料动力-统计分析空间结构的代表性

利用 2003 年冬、夏季北京城市大气环境现场科学试验综合观测资料,采用点-面结合的研究途径,可探讨城市建筑群“冠层”边界观测“点上”与城市区域“面上”大气动力-化学过程时空变化信息,研究观测点大气污染气、粒态的季节性相关结构与转化特征。

丁国安、徐祥德等分析冬、夏季城市大气污染时空变化特征发现:城市边界层污染物不仅在空间上具有同步性演变特征,而且各空气污染物种亦呈“同位相”时间演变特征,且 O_3 呈“反位相”演变特点。BECAPEX 试验分别在中国科学院地理所、白石桥、南郊高层建筑楼顶(50, 40, 80 m)连续采样获取自动记录资料,经处理的资料变化趋势可发现,2003 年 8 月试验过程中, SO_2 , NO_x , CO 3 类污染物种浓度变化在建筑群上边界呈相似变化特征(即同位相扰动特征), O_3 变化与上述 3 类污染物种浓度日变化位相相反,且变化振幅亦呈相反特征。分析 2003 年 8 月 BECAPEX 期间地理所、白石桥、南郊观测点资料,采用以上同样资料处理方法,发现 NO_x , SO_2 , CO 污染物种浓度亦呈类似冬季南

北测点相似演变特征,即城市不同测点污染过程空间同步性特征显著;但 O_3 呈“反位相”变化特征。城市建筑群边界层内不同测点污染物在建筑群上边界均呈类似空间“同位相”或“反位相”特征,但在不同测点变化幅度略有差异^[13-15]。

徐祥德和施晓晖等利用“一维 EOF”统计方法剖析大气污染气、粒混合物的成分结构的技术途径,揭示城市大气污染“面源”组合成分及其季节差异,上述统计-动力方案有关点-面结合的研究思路将对城市区域气溶胶污染源的追踪分析及其治理对策提供具有应用价值的科学依据;采用冬、夏季 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 粒子浓度时间序列及各污染物种浓度样本及自动站气象资料序列进行主成分分析,发现冬季 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 主成分以“煤烟型”源排放 SO_2 , NO_x 影响为主,而夏季 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 主成分以汽车尾气源排放 CO, NO_x 影响为主^[16-17]。

2 城市边界层大气动力-热力结构综合模型

卞林根、周明煜、陆龙骅、高志球等分析了北京城市大气边界层特征,揭示出城市建筑群高度与动力粗糙度相关(零平面位移)的线性回归统计特征,为数值模式边界层物理参数提供重要观测依据^[18-19]。

2.1 夏秋季边界层结构特征

2001 年秋季在北京地区进行了城市和郊区大气边界层的对比观测试验,分析了城、郊大气边界层结构热力和动力参数的差异,从而为研究城市热岛效应及提高城市空气质量的预报,治理空气污染提供了科学依据。

北京地区秋季城区和郊区逆温层的出现是不同的,且逆温层高度也有差异。城区由于热岛效应的作用比郊区出现逆温层的时间滞后,郊区的逆温一般从地面开始,顶部为 200 m 左右,城区由于下垫面特征,其逆温层底高度一般是 200~250 m,顶部高度为 550 m 左右,而且城区的逆温强度比郊区小。北京地区秋季城、郊区风速的垂直分布特征有较大差异,在 100 m 以下城区风速受建筑物影响,平均风速值比郊区小 2 m/s 左右,城区低层风速随高度增加显著,到 250 m 高度时风速达到最大,郊区风速随高度增加变化趋势不明显,到 600 m 高度后,城区和郊区风速逐渐混合。北京地区秋季城市热岛效应的强度近地面最大可达 3℃,通常出现在傍晚 20 00 左右,到了

高空,强度开始减弱,城郊温度在到达一定高度后开始趋于混合,由于郊区绿地面积大及温度比城区低,空气相对湿度大于城区,城区空气相对干燥,北京地区秋季城区的感热通量比郊区大^[20]。

夏季不稳定层结条件下, u/u^* 、 v/u^* 和 w/u^* 与 z/L 之间关系在47 m和120 m高度上符合1/3次律,无量纲温度方差符合1/3次律,并给出相应的拟合公式,而280 m高度上由于资料离散度较大,缺乏拟合基础。北京稳定大气边界层低层可按层结参数 z/L 分成两个区, $z/L < 0.1$ 为弱稳定区, $z/L > 0.1$ 为强稳定区。在弱稳定区相似规律可适用,在强稳定区则不适用,在强稳定区无量纲风速分量方差有随稳定度增大而增大的趋势,而无量纲温度方差差则保持不变。北京城市下垫面特征的变化主要影响风速的水平分量方差,对风速垂直分量方差没有多大影响。北京大城市群落“冠层”上层边界水平湍流运动与起伏大地形存在相似特征,这表明北京城市群落低层垂直湍流脉动强,即湍流垂直输送动力效应显著。铁塔顶层(320 m)观测结果表明,北京的水平风速脉动方差远高于其他城市、平原地形,亦类似于起伏地形湍流总体效应,这又表明了北京城市群落冠层上边界湍流尺度运动的“山地效应”特征。近地层320 m以下感热、潜热垂直输送显著,近地层热力非均匀性导致城区流场辐合、辐散多中心现象,即呈流场多尺度特征(次生热岛效应),城市低层湍流尺度运动风速垂直脉动分量显著,且城市低层阻风区水平脉动分量弱,因此城市热岛群多尺度效应与城市建筑群“冠层”边界内类似起伏地形效应的湍流垂直输送动力效应的共同作用可导致城市大气污染局地“堆积”、“滞留”的非均匀空间分布。城市建筑群上空(320 m)为大尺度远距离输送,即大气污染周边源影响显著区;城市近地层低层则为大气污染近郊输送影响区。由于上述大气动力结构及污染过程多尺度效应,城市气溶胶浓度变化亦呈多尺度特征,时间尺度从数小时周期到数天周期尺度,且与区域大气动力结构风场周期谱尺度特征相似^[21-22]。

2.2 冬季边界层结构特征

较系统研究北京城市“空气穹隆”垂直剖面动力、热力结构及其参数。重污染时城区上空多层逆温及其贴地逆温,平均200~400 m为较强逆温层,白天下垫面加热,逆温层上抬,夜间逆温层下降、变厚,热岛显著,且出现贴地逆温;城区夜间存在低于

200 m、小于2~3 m/s建筑群“阻风区”;城市300 m内感热准常通量输送区;近地面热岛强度晴天为4℃,阴天为2℃左右,城区逆温层与风向、风速切变的厚度显著高于郊区;描述出“空气穹隆”大锅盖动力、热力三维空间结构各类垂直热力结构参数及其综合物理图像。采用RAMS与MM5模式亦模拟出上述逆温层及其动力特征。

城区和郊区的空气穹隆有明显的日变化,午后城区空气穹隆有时发展到800 m以上,郊区明显偏低。由于郊区夜间常出现贴地逆温,逆温层的平均底高要比城区低。郊区的空气穹隆比城区低50~100 m,逆温层的厚度平均约为100 m。城区和郊区日落至午夜逆温出现的频数小于其他时段,郊区逆温频数日出前后最大并高于城区。逆温梯度的日变化与空气穹隆的高度变化特征基本相似^[23]。

在冬季北京城市边界层中,风随高度的变化并不总遵循对数关系,在午前及夜间,风速与高度之间对数关系的不显著率可达30%~40%,不能简单套用常用的由Monin-Obuhov相似理论获得的近地面层动量、热量和水汽通量的计算公式^[24]。

冬季在城市边界层中,零平面位移不可忽略。在大气所铁塔附近,由梯度观测资料估计的零平面位移 $d = 20$ m,地面粗糙度为 $z_0 = 1.3418$ m。对照不同作者用不同时段超声资料所获得结果,该组数值仍是合理的。鉴于所用资料均不足够多,该结果尚需更多的资料来进一步验证^[19]。

2.3 城市雾边界层特征

低空风切变的增大激发湍流活动对雾的形成有激发作用。张光智等研究发现,采用铁塔上布设的高频率采样的超声风速仪以及平均观测仪器资料分析计算,均得到起雾时刻在边界层低层有关扰动信号出现,即起雾前,边界层低层观测到扰动动能特征出现显著跃升。起雾前低空风切变增大,有利于湍流的激发。采用风廓线仪观测资料,计算了边界层中的湍流应力,发现起雾时刻低空湍流动量垂直输送出现显著跃升,有利与上下层的湍流混合。低空有冷空气从东向西插入,这种弱冷空气从低空向暖空气堆插入,动力与热力混合作用使低空迅速降温,有利于低空冷空气扩散触发雾的形成。大气中污染物 SO_2 及 NO_2 等浓度增大对北京大雾凝雾的触发有显著影响,北京大雾在起雾前,低层凝结度也迅速增长;大雾在起雾期间,随着凝结度增大, SO_2 及 NO_2 浓度反而下降,这与凝雾过程对凝

结核的消耗、冲刷有关。因此,凝雾过程中 SO_2 或 NO_2 积聚浓度有一个从低到高和再从高降低的过程,该过程受 SO_2 及 NO_2 积聚浓度影响^[25-26]。

3 城市大气污染垂直剖面结构及污染特征

丁国安、杨东贞、郑向东和孟昭阳等结合城市及近郊大气边界层结构同步观测,获取了北京大气边界层空气污染物的三维结构特征。观测研究揭示城市 TSP 浓度随高度增加而减少,60% 以上的 TSP 分布属细粒组,北京冬季气溶胶以矿物燃料类挥发性元素及地壳和盐类元素为主,元素浓度随高度增加而减少。人为排放的挥发性元素、盐类元素主要分布在细粒组,地壳类元素主要分布在粗粒组。观测发现自然源和人为源均对北京气溶胶浓度变化作用显著,逆温和北京局地及其周边邻近地区的排放源综合影响可显著加大城市边界层气溶胶浓度^[27]。

采用无动力采样器铁塔观测资料,发现北京城区 100~200 m 为城市污染气体底层“堆积”高值区的上界面,平均而言, SO_2 浓度 1 月最高, NO_2 浓度 1—2 月亦呈高值,不同月份 SO_2 与 NO_2 浓度垂直廓线均和逆温结构相关,污染物浓度峰值对应逆温层下界面^[28]。采用系留气艇边界层垂直高分辨率探测系统,获取了北京城市边界层和郊区 O_3 垂直结构,发现逆温层对 O_3 浓度垂直“跃变”结构及其污染物“堆积”的“锅盖”效应有密切关系,且与逆温层厚度相关不明显。冬季、夏季边界层中逆温层顶高度和边界层中低层 O_3 垂直剖面浓度有较密切关系,逆温层顶下部有污染物的堆积层,即低层大气中 O_3 的低值区对应于逆温层下部污染浓度的堆积区,在逆温层上部 O_3 浓度有一个明显的跳跃。激光气溶胶雷达垂直剖面观测结果揭示出尽管时次 0~1.2 km 不同高度大气边界层消光系数有各种变化,但一个突出的特点是消光系数的变化主要集中在 400 m 以下低层大气中^[29-31]。

北京 325 m 铁塔所观测到的气溶胶垂直分布大致分为两种类型:渐缓递减型和快速递减型。静稳天气以及污染日气溶胶垂直分布属于渐缓递减型,而弱冷空气过境及清洁日气溶胶垂直分布属快速递减型,气溶胶垂直分布特征与边界层大气动力、热力结构及湍流特点密切相关。观测结果还发现 320 m 高度在西南和东南风向条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 均明显出现高浓度值,而其他高度 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度

和风向没有关系。足痕分析计算结果表明:这是由于来自污染相对较重的河北省保定、石家庄以及天津、山东等北京偏南地区对该高度的贡献,而低层仅受北京局地源的影响^[32-33]。

获取了城市低层大气主要空气污染物的时空变化特征,其中包括各种空气污染物的日变化,采暖期前后的比对,城近郊 O_3 的比对, $\text{PM}_{2.5}$ 和各种气体污染物的关系和交通要道有关 $\text{PM}_{2.5}$ 的观测研究等。

4 城市大气污染空间结构多尺度模型

4.1 大气污染多尺度特征

徐祥德、周秀骥等研究了城市大气污染空间结构多尺度特征^[6,34]。以迅速发展的城市群落——北京及周边区域为样本,利用 2003 年 2 月、8 月北京城市大气环境现场科学试验(BECAPEX)建筑群边界层大气污染动力-化学过程观测资料以及相关的气象要素、卫星反演气溶胶光学厚度等综合资料,进行空间结构动力-统计合成分析,剖析北京城市及周边区域大气污染影响域的空间结构及多尺度特征。冬、夏季北京城区不同方位测点近地层大气动力、热力结构及建筑群上边界各类污染物种均具有“同位相”变化及其“影响域”空间尺度特征。城市大气动力、热力特征空间结构中城市边界层建筑群湍流尺度特征对城市大气污染多尺度特征具有重要影响,冬、夏季空气质点后向轨迹特征呈多尺度特征,且描述出不同季节污染源空间分布的尺度特征差异,城区大气污染周边源轨迹路径主体来自城市近郊固定工业面源或采暖面源,且冬季周边污染源扩散输送距离较夏季呈更远的空间尺度,上述结论描述出城市区域大气污染源影响和大气动力结构引起的多尺度空间影响域及季节性特征。功率谱分析发现冬、夏季颗粒物浓度和大气风场动力结构的周期谱相吻合,冬季以长周期为主,夏季则多为短周期,揭示出冬、夏季大气环流季节性尺度特征对大气污染变化周期特征的影响效应。

4.2 城市热岛的多尺度特征

于淑秋、林学椿和张光智等研究结果表明北京城市热岛存在明显的季节变化,其中以冬季最强,春、秋季次之,夏季最小。城市热岛的季节变化主要发生在市区,而郊区温度冬夏差别不大,利用市区与郊区之间的局地气温差来定义北京城市热岛强度。1960—2000 年北京城市平均热岛强度为 0.94℃。随

着北京城市建设和城市化速度的加快,北京城市热岛强度也在明显地增加,1981年是显著的跃变点,跃变后比跃变前北京城市热岛强度增加了 0.80°C 。北京城市热岛强度具有显著的年际增温,年平均热岛强度的增温率为 $0.3088^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,近40年市区年平均温度的增温率为 $0.3552^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,而郊区的增温率只有 $0.0464^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,市区的增温率是郊区的7.7倍。可见市区因人类活动引起的增温率,足可以改变市区的自然增温率。基本建设投资总额增长率或房屋竣工面积增长率较之于改革开放前均为成几十倍乃至百倍增长,热岛强度在改革开放前的增温率为 $0.001^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,改革开放后为 $0.2517^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,后者为前者的257.1倍^[35-36]。滤波分析表明,北京热岛效应10年变化的增强区域与城市位置十分吻合。北京城市热岛效应发展趋势仍是严峻的,须进一步努力进行北京及周边地区环境的改善^[37]。

徐祥德等提出了卫星遥感-地面观测相结合进行城市热岛分布综合变分分析的技术途径。研究结果揭示了城市热岛与城市建筑群面积、高度存在着相关关系,提出城市区域尺度热岛效应可由强、弱程度不同的次生热岛效应结构“合成”,即北京地区热岛分布呈非均匀特征,城区东西两侧为“强热岛”区,城东北园林区与古城中轴线区域则为相对弱热岛区,建筑群及其中高层楼高密度与热岛效应相关显著,尤其是海淀与西城区、朝阳区中高层建筑群为“强热岛”区,其对应中尺度次生环流辐合区,城市中古建筑中轴线、西部颐和园等园林区为“弱热岛”区,其对应次生尺度环流辐散区。上述研究结果揭示城市建筑群相关次生热岛效应可导致局地次生尺度环流辐合结构,可以为城市发展有关建筑群布局与园林绿地规划设计提供科学依据^[38-39]。

5 城市环境大气重污染过程周边源影响域

徐祥德、周秀骥等提出北京城市周边污染源影响问题是北京环境污染治理决策急待解决的关键环节之一。综合分析2001年1—3月BECAPEX的MODIS与TOMS卫星遥感资料,提出追踪污染源“上游”风场合成矢量法。综合分析北京地区重污染过程轨迹特征,并选取2001年1—3月重污染过程与空气质量良好时段作为分析样本,采用HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模式进行模拟试验,揭示了北京城

区重污染过程河北、山东、天津等地城市群落污染排放源扩散轨迹,选取北京城区异常重污染过程个例,并用RAMS(Regional Atmosphere Model System)模式模拟试验,并揭示了北京城区异常污染过程周边源贡献率,进一步证实了北京城市重污染过程加剧的重要因素之一是南部周边城市污染物外源的输入。北京城市重污染过程与南部周边城市群落排放源影响相关显著,北京周边向南开口的类似“马蹄型”地形可能导致周边源远距离输送的污染物“滞留”效应,形成北京与南部周边之间近似南—北向带状影响域,揭示出北京周边南部、东南部地区(河北、山东、天津等省市)城市群落污染源“影响域”及其扩散“途径”。采用2003年2月白石桥测点 SO_2 重污染日样本滤波处理后中尺度风场,利用Hysplit-4扩散模式模拟的空气质点后向轨迹分布特征,分析结果表明,冬季北京城区 SO_2 浓度较高时,滤波处理后中尺度天气系统背景下,模拟分析的空气质点后向轨迹主要来自城市近郊东北路径,部分来自近郊东南或偏西南路径^[6]。

以 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为因变量,经逐步筛选建立回归方程。筛选结果发现:济南南风、济南西风、石家庄南风、大连西风、潍坊南风为关键因子,这些被筛选出的关键因子表明,影响北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的周边源可能分别位于北京的南、西南、东南和东部,模型统计检验超过了显著性水平。上述回归方程计算筛选结果 $\text{PM}_{2.5}$ 相关区域与卫星遥感气溶胶高浓度区域相似,此结果进一步证实北京及周边区域污染影响域动力效应的重要性^[40-41]。

6 北京及周边区域气溶胶分布特征及其与区域气候效应

徐祥德和施晓晖等通过TOMS和MODIS多年卫星资料反演,结合地面观测 PM_{10} 浓度资料进行综合分析,并利用卫星TOMS反演气溶胶光学厚度资料和北京及周边各气象站观测日照时数、雾日数、低云量等气象要素资料进行统计分析,探讨了北京及周边城市群落的气溶胶分布及其区域气候效应特征。研究结果表明:通过晴空、稳定天气条件MODIS卫星遥感气溶胶反演指数结合地面实测场进行变分订正多样本合成分析,亦可发现北京与南部周边“马蹄型”大地形“谷地”内类似“三角形”气溶胶高值区的分布特征图像。城市群落污染物大尺度

迁移、扩散过程可构成更大空间尺度城市群落气溶胶相对持续稳定的特征分布,北京及周边区域在特殊大地形影响背景下 TOMS 卫星气溶胶反演指数高值区及其与晴空日照时数的区域相关分布均类似于 MODIS 气溶胶反演光学厚度变分场合成图像,即大气气溶胶影响效应在北京及周边地区表现显著。晴空日照时数与 TOMS 气溶胶指数两者负相关高值区域与 20 世纪 80—90 年代日照时数偏差负值显著区分布特征近似吻合,且气溶胶指数与晴空日照时数的逐日变化呈互为反相关关系。京津地区城市气溶胶影响高相关区偏于两城市南部周边范围,其“重心”偏于京津城市群落南部,主体大范围向南延伸,构成类似偏心椭圆影响域。1979—2000 年北京及周边地区冬季的气溶胶光学厚度呈显著增加趋势,日照时数则呈显著减小趋势,两者“反位相”变化特征亦较为明显,冬季低云量、雾日数与气溶胶光学厚度则基本上呈年际变化“同位相”特征,这一研究结果可能反映了该区域气溶胶影响的局地气候效应。日照时数、低云量和雾日数的年际变化趋势呈区域性显著差异,城市群落下风方存在雾或低云量年代际增多趋势显著区,上述现象可能与气溶胶影响域内城市群落污染扩散动力过程中区域性气流汇合流场局地气候特征相关,此类局地动力特征可能导致城市群落下风方气溶胶影响的区域性“加剧”效应。北京城市南部周边地区低云量均呈显著增加趋势,尤其是 80 年代以后随着北京南部周边地区城市高速发展,南部周边城市群落的延伸与扩展,城市区域低云量增加更为显著。北京北部周边地区低云量年际变化分析表明,北京周边南北两侧低云量变化趋势存在差异,即南部低云量增加趋势较北部显著,北京城市周边南部河北、山东等省各站低云量与气溶胶指数呈大范围正相关显著特征,这反映了城市群落气溶胶对局地区域气候的影响效应^[42-44]。

7 北京市典型污染源贡献的估算

唐孝炎、郝吉明、邵敏等对北京市典型污染源贡献做了大量的估算研究工作。

7.1 北京机动车排放因子

郝吉明等对北京市年机动车保有量及其构成、车辆登记分布和累积里程分布以及车流分布和车速变化规律进行调查分析,获得了北京机动车基本的

运营特征参数,在此基础上,建立了适合北京市的机动车排放因子模型(Mobile5-Beijing 和 Part5-Beijing),进一步确定了北京市现状年机动车污染物的排放总量和分车型的排放分担率^[45]。

7.2 北京重点源排放清单

建立了北京市现状年重要污染源(包括交通源、工业源、无组织排放、民用源)网格化的污染物(SO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, VOC)排放清单,包括北京市区 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 面排放源清单和主要点源排放清单。补充建立了北京及周边地区网格化 NH_3 排放清单,对各类的污染源排放的 VOC 的化学物种(烷烃、烯烃、醇、醛、甲苯、异戊二烯等)分布数据进行收集,建立了 VOC 排放源的化学物种划分的方法^[46]。

7.3 北京周边地区源排放清单

对北京周边地区(天津、河北)的污染源活动水平和排放因子数据进行了收集,建立了周边地区的排放清单(SO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, VOC)。针对空间分辨率难以满足空气质量模型要求的问题,建立了基于 GIS 技术的面源空间分配方法^[47]。

7.4 大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源

邵敏、唐孝炎等对北京大气 VOCs 进行了研究。结果表明:在大气 VOCs 的混合比中大约仅占 15% 的烯烃化合物提供了大约 75% 的大气化学活性,其中尤以 C4 和 C5 的烯烃组分最为重要。大气 VOCs 各类排放源的成分谱研究表明,北京市大气中的烯烃主要来源于机动车尾气的排放和汽油挥发,对这两类源中的烯烃组分进行削减,将是控制北京市大气光化学烟雾污染的有效措施^[48-49]。

8 城市气象模式系统技术发展

8.1 北京城市冠层模式

李晓莉等在综合国外一些较先进的中尺度模式城市作用参数化方案基础上,从城市下垫面结构对城市边界层大气作用的物理机制及实际应用两方面出发,对城市下垫面结构和人为活动等因素对边界层结构的影响及中尺度模式中城市化作用的合理体现等问题进行了较全面的考虑,根据项目获得的北京城市大气边界层观测数据分析结果,改进和设计出能够较全面、细致地描述城市结构对大气边界层动力、热力结构的影响,且适合中尺度模式结构特点的城市冠层参数化方案(UCP),并实现了其与 MM5 模式的耦合。试验结果表明:MM5-UCP 模式不仅

成功地模拟出了与观测结果相符合的北京城市边界层热力结构特征,如城市热岛效应及其日变化特征、市区夜间出现的悬浮逆温结构以及市区和郊区的温度垂直结构差异等特征,同时也成功地模拟出了城市近地层风场和湍流动能的城市边界层动力结构特征。与原方案相比,UCP方案在很大程度上提高了MM5模式对城市边界层结构的模拟能力^[50]。

8.2 街谷环流和热力结构的数值模拟

桑建国等应用动力和热力模式模拟了街谷中流场和温度场的日变化过程。计算实例表明,该动力和热力模式可基本反映街谷环流和热力环境特征,经过改进,模式可作为城市街谷大气环境研究的工具,用于城市街谷和建筑群风环境和热力环境研究以及街谷中空气污染物传输和扩散的计算,也可供城市街道规划设计参考,街道模式的多尺度城市大气污染模式库,以适合城市大气多尺度污染的不同层次的需求^[51]。

8.3 城市高大建筑群周围风环境模拟研究

刘辉志等采用风洞热线测量、风洞刷蚀技术和计算流体力学数值模拟等方法,对北京地区某高大建筑在北京地区盛行风条件下的风环境开展物理模拟和数值模拟,并进行相互验证和比较。研究结果表明3种方法得出行人风场结构和分布基本一致。研究还分析了各方法的长处和局限,风蚀技术可用于单个高大建筑的风环境评价,而对大规模建筑群的评价更显出其优越性,它可提供大面积区域风环境的全貌;风洞热线测量可得出整个评价区的风环境,并可针对重点关注地区,如行人活动频繁的开放空间、可能出现强风的区域等,进行加密的测量,同时也可以对建筑物周边三维空间风场进行测量,以便得出强风区的结构和形成机制;数值方法更为方便灵活,可以通过不同分辨率的网格,得出不同尺度域的风场的水平及空间结构,更进一步可采用变网格或套网格方式,使风环境评价区域从大到小,从粗到细,从宏观尺度到微尺度。3种方法的相互配合,可使城市高大建筑的行人风环境研究更为科学、合理^[52-53]。

9 空气质量模式技术发展

9.1 二次气溶胶模拟试验

刘煜、李维亮、周秀骥等实现了对美国EPA发展的公共多方尺度空气质量模式(CMAQ)的移植和运

行。该模式包含RADM2、CB4和SPARC99 3种气相反应机制,以及较完整的气溶胶模式和气-粒平衡模块,对酸沉降、 O_3 、气溶胶具有较强的模拟能力。结合MM5气象模式进一步对北京市及华北地区夏季二次大气气溶胶进行了模拟,与项目观测的 NO_x 、CO、 O_3 、 NH_3 、 HNO_3 、 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的对比,表明CMAQ模式能够较好地模拟北京市以及华北地区污染物的变化。模式结果和敏感试验表明河北、河南和山东地区 NH_3 的浓度较高,高浓度的 NH_3 使得二次气溶胶中硫酸盐气溶胶生成效率提高了30%以上,特别是在邯郸、安阳和长治交界地区其作用更显著,达到了50%,而且 NH_3 还会增加二次气溶胶中含氮气溶胶和铵盐成分,二者的质量浓度和与硫酸盐气溶胶相当。由于北京地区边界层高度在白天较高,中午平均高度为1500 m,这使得 SO_2 、 NH_3 和 HNO_3 可以输送到边界层上部850 hPa,造成硫酸盐、铵盐和硝酸盐分别在边界层上部和下部形成各自的高浓度区。 $PM_{2.5}$ 因其寿命较长,可以被输送到对流层的中层,形成深厚的气溶胶层,构成了北京地区所存在的气溶胶的穹隆。模拟结果表明:如要控制华北地区夏季大气中气溶胶的浓度,除了减少 SO_2 和 NO_x 的排放和一次气溶胶的排放外,降低大气中 NH_3 的排放也是有效办法之一。结合CMAQ模式和观测数据,对北京市上空存在的气溶胶的穹隆形成机理和成因进行了探讨^[54-55]。

刘煜等以背景观测数据为基础,利用气溶胶热平衡模式研究了背景地区硝酸盐的气-粒平衡状态和气-粒转化过程,提出了一种硝酸盐气溶胶化学生成反应路径的判别方法。该气-粒平衡模式Equisolii是由美国Stanford大学发展的,它可以用来求解气相和不同大小的颗粒物相之间的热平衡方程,还可以用来求解颗粒物内的平衡方程,从而得出求解气体和不同大小的颗粒物之间质量扩散方程所需的饱和蒸气压项。该研究发展了硝酸盐气溶胶化学生成反应路径的判别方法,分别用正负离子对之差,判别不同反应发生的可能性,从而推断硝酸盐气溶胶化学生成反应路径。

9.2 北京地区 SO_2 污染的长期模拟及不同类型排放源影响的计算与评估

颜鹏等用拉格朗日-欧拉混合型污染扩散模式Hysplit-4采用分行业、分季节、高分辨的北京市 SO_2 排放源清单和NCEP气象分析场资料,根据源-接收

点关系,估算了北京 2000 年和 2001 年地面 SO_2 逐日变化,分析了北京当地及周边地区不同类型排放源对北京地面 SO_2 的影响,与实测值对比表明,模式较好地模拟出北京地面 SO_2 的逐日变化特点和季节分布,对影响北京地面 SO_2 的各种排放源贡献估算说明 2000 年和 2001 年北京市 SO_2 主要受北京当地排放影响较大,周边源影响大约占 20% 左右。但在一定天气条件下,周边源贡献仍可超过 30% 以上,甚至个别时候超过 40%;在北京市 7 类排放源中,占北京市区排放量较少部分的工业面源和锅炉面源对北京市区的 SO_2 贡献很大,是北京市 SO_2 污染治理的关键,这两种类型排放源以及来自周边排放源的贡献是北京市地面 SO_2 污染的主要来源^[56-58]。

9.3 影响北京地区的沙尘暴输送模拟

周秀骥、徐祥德和颜鹏等用 Hysplit-4 模式,研究了 2000 年影响北京的沙尘暴传输路径,进一步耦合沙尘起沙模型,对 2002 年 3 月影响北京的沙尘气溶胶输送进行了多天模拟试验。其中模式起沙模型采用了 Marticorena, Gillete 和 Westphal 的起沙机制简化修正的起沙算法,气象数据采用客观分析的气象场数据。结果表明,模式能够很好地模拟出沙尘气溶胶的浓度量级和发生时间,但对沙尘暴的持续影响模拟较差。详细的地表、土地利用信息和准确的气象场数据对准确模拟沙尘的输送起关键性作用,对模式的进一步改进和对结果的检验和评估还需要通过大量观测数据的对比做深入的研究^[59]。

9.4 区域化学输送模式中 NO_x 和 O_3 源示踪法

江文华、马建中将 NO_x 和 O_3 重点源示踪法引用到区域化学输送模式中,结合中尺度气象模式 MM5 输出的气象背景场,以太原和石家庄地表排放产生的活性氮氧化物和它们所产生的 O_3 为例,模拟了示踪污染物浓度的时空分布和变化。结果显示,示踪法是一种有效的研究区域氮氧化物以及臭氧来源和输送转化过程的方法。在晴朗少云、高温低湿、大气层结稳定的条件下,太原和石家庄的地表污染物排放产生的氮氧化物本身并不能被输送到北京,但通过它们产生的 O_3 和 HNO_3 可以随气流输送到北京,对北京的地表附近污染造成影响。这种天气条件下,太原和石家庄的地表污染物排放产生的氮氧化物所引起的臭氧经 8 h 可以被气流输送到 300 km 之外的北京,但对北京的地表附近臭氧污染贡献很小。需要指出的是,研究示踪的是经

NO_x 催化循环生成的 O_3 ,在区域 O_3 是处于 NO_x 控制的情况下,可以反映出污染源对大气 O_3 生成的贡献,但在区域臭氧是处于 VOC 控制的情况下,就不能完全反映出污染源对大气臭氧生成的贡献。有关北京及周边地区臭氧与 NO_x 和 VOC 的关系尚需做进一步深入研究^[60]。

9.5 城市尺度的大气污染 CAPPS 模式及统计模型的应用

徐大海和朱蓉等采用了有限体积积分法求解大气平流扩散方程,建立了非静力多箱大气污染潜势指数预报模式,同时,还建立了大气污染指数预报模式,即城市空气污染数值预报系统(CAPPS),并实现了大气污染数值预报模式与高分辨率中尺度数值天气预报模式的嵌套,进行实时业务运行,可预报出 24~36 h 内 SO_2 , NO_x , NO_2 , TSP, PM_{10} 和 CO 的污染指数。目前, CAPPS 系统已成为包括北京在内的全国 47 个环保重点城市气象部门开展城市空气质量业务预报的主要工具之一。

该模式使用污染物浓度反演污染源强的方法,替代污染源排放的数据,避免了因污染源调查所带来的不确定性对污染预报的影响;投入预报更为方便、实用。CAPPS 模式的预报准确率平均可达 60% 以上,而且对高浓度的污染表现出一定的预报能力, CAPPS 预报系统既可用于一个城市的污染预报,也可同时对多城市的空气污染指数进行预报,嵌套的中尺度模式和大气污染物平流扩散模式(CAPPS)经过试验、准业务运行、效果检验后,投入空气污染业务预报使用,模式运行稳定、计算效率高。分析结果表明 47 个城市应用 CAPPS 模式预报 API 指数与观测的 API 的相关系数为 0.707,说明模式的预报效果良好^[61-62]。

9.6 大气污染及紫外辐射数值预报模式

周丽等利用多元回归统计方法建立了主要污染物与气象要素的回归方程。污染状况的这种季节变化受污染源排放和气象条件的变化影响。根据北京地区地理条件、气候特点及各种污染物的年、季分布特征,分别建立了不同污染物 SO_2 , NO_2 , RSP (PM_{10}), CO 不同季节的污染指数预报方程,方程所需的各气象要素来自中尺度数值预报结果,预报准确率达到 50% 以上,对 SO_2 , NO_2 , CO 的预报准确率比颗粒物预报准确率高^[40-41]。

沈元芳等引进的 NASA 大气辐射传输模式计算由于水汽, O_3 , CO_2 , O_2 , 云和气溶胶的吸收,以及

由于云、气溶胶和各种气体的散射产生的太阳辐射通量。2000 年 9 月起,紫外线辐射预报在国家气象中心 Cray-C92 业务操作系统上实施了连续的业务试验运行。2003 年 6 月起,将 NASA 短波辐射方案加到了 T213 模式中,进行紫外辐射预报,这个产品除了被应用于专业气象台对外服务中外,从 2001 年 9 月起,还在中央电视台全国城市环境预报中发布了 UV(强度)预报,并向全国 31 个省市推广^[63]。

9.7 CMAQ-MOS 空气质量预报方法

已经建立的污染潜势预报方法和一些统计相关预报方法,主要是根据污染物与气象要素之间的相关,利用气象模式的预报结果进行预报,在这些方法中,没有考虑空气质量模式预报的结果。由于 CMAQ 模式可以很好地预报污染浓度的变化趋势,为此,许建明、徐祥德、刘煜等建立了 CMAQ-MOS 动力-统计相结合的新技术,称之为 CMAQ-MOS 空气质量预报方法,具体方法是用回归方法或 Kalman 滤波法建立模式产品和多类预报因子相结合的统计模型。

CMAQ 模式对多类污染物不同尺度分布及其变化倾向具有较强的预报能力,但由于污染源时空特征十分复杂,即模式采用的平均源排放清单难以精细、客观描述预报区域污染源强度不同尺度的时空变化,CMAQ 模式结果尚存在类似其他模式污染浓度预报量与实况相比明显偏低的“系统性”误差。为了修正 CMAQ 模式产品源排放清单产生的“系统性”预报偏差,利用试验阶段不同季节 CMAQ 模式产品与观测资料,建立 CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正预报模型,并采用未参与统计样本的检验方法,评估 CMAQ-MOS 方案预报能力,试验研究结果表明,CMAQ-MOS 方案可显著降低由于污染源影响不确定性产生的模式系统性预报误差。

采用 CMAQ-MOS 统计修正模型动力-统计相结合的空气质量预报新途径,利用区域模式产品与区域测点大气污染浓度平均值,可建立区域尺度 CMAQ 模式统计修正模型,检验结果表明该区域尺度 CMAQ-MOS 统计修正模型亦可明显提高 CMAQ 模式空气质量区域预报水平。在大气污染具有同位相变化特征的“影响域”范围内,利用点-面结合的预报思路,根据空间不同站点污染物的同位相变化特征,可以用一个中心测点的 CMAQ-MOS 产品预报周边区域面上其他预报点的模式产品“再分析”场。^{万方数据}分析结果表明,利用 CMAQ-MOS 方法的

预报结果和检验,说明该方法可以很好地预报污染物的变化和浓度^[64-65]。

9.8 CMAQ 源同化技术模式预报途径

徐祥德、许建明、刘煜、张建春、胡江凯、吴昊等在前期的 CMAQ 模拟工作基础上,把 CMAQ 模式移植到国家气象中心的神威巨型机上,并与业务预报的 MM5 衔接,Trace-p $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的亚洲地区污染排放源也被应用到模式中。在业务化过程中,建立了预处理、源程序、执行程序 and 输出结果以及后处理程序的管理库,由于中国气象局业务预报的资料统一利用 MICAPS 系统格式传输,项目组把 CMAQ 的模式输出转换为 MICAPS 格式。这样模式结果可以利用现有的传输系统传输到北京及其周边地区乃至全国。通过北京、河南和辽宁等地对模式结果进行的对比检验,发现模式可以很好地预报污染物浓度的变化趋势,但预报的浓度值比实测值偏低,这主要是由于排放资料精度低和资料滞后引起的。模式运行近 1 年来,非常稳定,能满足业务预报的要求。北京主要采暖期 CMAQ 模式预报结果与观测的对比和它们的滑动相关以及郑州的对比检验说明:模式可以较好地预报污染物的变化趋势,与观测值的相关很好,但预报的浓度值偏低,其主要原因是目前全国范围与区域排放源资料尚未完善,尤其是缺少动态的基本排放源清单。长久以来,排放源问题是制约国内空气污染预报水平的“瓶颈”难点。为此徐祥德、周秀骥、许建明等根据牛顿张弛逼近“Nudging”同化思路,针对影响空气质量模式预报能力的核心因素——污染源,构造空气质量模式源同化模型,通过模式计算使污染源逐步协调或“适应”,以使模式污染物浓度预报逼近实测值。根据大量预报样本对比分析结果,已表明该源同化技术可明显提高空气质量模式的预报水平。目前徐祥德、程兴宏等已初步完成全国范围重点城市源同化数据集,并与中国环境年鉴排放源资料对比分析,初步证实该模式源同化新技术反演源具有显著效果,有望作为城市排放源评估与估算的技术工具之一。

9.9 密云水库区域大气-土-水污染过程复合相关源

杨东贞、徐祥德采用密云水库 15 km 处 WMO 区域空气污染本底站上甸子站 1990—2001 年降水化学资料,并结合 2002—2003 年现场科学试验阶段获取的大气干沉降和湿沉降资料,从大气-土-水污染过程的复合相关源角度,综合分析了大气干、

湿沉降以及白河沿岸农田、矿区和城镇污染源对密云水库的水质综合影响特征。分析结果表明,该时段密云水库区域大气降水中离子以 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 和 Ca^{2+} 为主;密云水库湿酸沉降量夏半年(4—9月)大于冬半年(10月至次年3月),其年际变化呈上升趋势,年平均达 1038.45 t,最高的 1996 年达 1766.31 t,最低的 1994 年为 604.02 t;密云水库区域大气降水 pH 的多年平均值为 5.20,降水呈弱酸性,pH 值年际变化呈下降趋势。密云水库水体不同深层的 pH 值均大于 7.0,pH 值垂直和水平空间分布呈非均一性特征,同一区域 pH 值随水深呈下降趋势;2002 年和 2003 年密云水库降尘量分别为 13513.08 t 和 3577.64 t,春季降尘量为全年之首,分别占其全年的 61.91% 和 44.56%。由于大气干、湿沉降中含有多种重金属元素及有害元素,它们可能在一定程度上对库水富营养化、潜在重金属污染以及库水酸化起“加剧”作用。上述综合分析结果揭示出密云水库区域大气-土-水污染过程复合相关源特征及其多圈层相互作用效应。另外,夏季(雨季)是局地土壤污染源由于受暴雨或强降水冲刷后通过入库水系山谷坡地汇流,引起区域性大气-土-水连锁污染过程,导致水库或河流水质污染。统计分析亦发现密云水库水质污染可能与水库周边及上游局部区域降水冲刷和汇流因素相关,水库污染物浓度变化与水库上游局地区域降水量呈较显著的相关,这些相关特征揭示了水库水质污染过程大气-土-水多圈层相互作用效应。提出了水库污染复合相关源分析法观点及其追踪入库水系上游污染源空间分布技术途径^[66-67]。

参考文献

- [1] 徐祥德,卞林根,丁国安. 城市大气环境观测工程技术与原理. 北京:气象出版社,2003.
- [2] 徐祥德. 北京及周边地区大气污染机理及调控原理研究. 中国基础科学,2002(4):19-22.
- [3] 卞林根,程彦杰,王欣,等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究. 应用气象学报,2002,13(特刊):13-25.
- [4] 丁国安,孟昭阳,于海青,等. 北京城区大气边界层空气污染特征观测研究. 应用气象学报,2002,13(特刊):82-91.
- [5] 徐祥德,丁国安,卞林根,等. BECAPEX 科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响. 气象学报,2004,62(5):663-672.
- [6] 徐祥德. 城市大气环境污染动力学理论问题. 应用气象学报,2002,13(特刊):1-12.
- [7] Xu Xiangde. Beijing tackles its environmental problems with a new field experiment. *Environment and Health Perspectives*, 2002, 110(9):A501.
- [8] Xu Xiangde, Xie Li'an, Ding Guoan, et al. Beijing air pollution project to benefit 2008 Summer Olympic Game. *Amer Meteor Soc Bull*, 2005, 86(11):1543-1544.
- [9] 徐祥德,周秀骥,翁永辉,等. 星载 MODIS 资料与地面光度计深测气溶胶变分分析研究. 科学通报,2003,48(15):1680-1685.
- [10] Xu Xiangde, Zhou Xiuji, Weng Yonghui, et al. Study on variational aerosol fields over Beijing and its adjoining areas derived from Terra-MODIS and ground sunphotometer observation. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(18):2010-2017.
- [11] 徐祥德,周丽,周秀骥,等. 城市大气环境重污染过程周边源影响域. 中国科学(D辑),2004,34(10):958-966.
- [12] Xu Xiangde. Study of a GIS-supported Remote Sensing Method and a Model for Monitoring Soil Moisture at Depth//Proceedings of SPIE: Ecosystems' Dynamics, Agricultural Remote Sensing and Modeling, and Site-specific Agriculture, 2004:51-53.
- [13] 丁国安,孟昭阳,于海青,等. 北京城区大气边界层空气污染特征观测研究. 应用气象学报,2002,13(特刊):82-91.
- [14] 徐祥德,周秀骥,施晓晖,等. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征. 中国科学(D辑),2005,35(增刊1):1-19.
- [15] Xu Xiangde, Zhou Xiuji, Shi Xiaohui, et al. Spatial structure and scale feature of the atmospheric pollution source impact of city agglomeration. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(4):1-24.
- [16] 徐祥德,施晓晖,丁国安,等. 城市冬、夏季大气污染气、粒态复合型相关空间特征. 中国科学(D辑),2005,35(增刊1):53-65.
- [17] Xu Xiangde, Shi Xiaohui, Xie Li'an, et al. Spatial character of the gaseous and particulate state compound correlation of urban atmospheric pollution in winter and summer. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Suppl II):64-79.
- [18] 陆龙骅,卞林根,程彦杰,等. 冬季北京城市近地层的气象特征. 应用气象学报,2002,13(特刊):34-42.
- [19] 高志球,卞林根,逮昌贵,等. 城市下垫面空气动力学参数的估算. 应用气象学报,2002,13(特刊):26-33.
- [20] 王欣,卞林根,逮昌贵. 北京市秋季城区和郊区大气边界层参数观测分析. 气候与环境研究,2003,8(4):475-484.
- [21] 周明煜,姚文清,徐祥德,等. 北京城市大气边界层低层垂直动力和热力特征及其与污染物浓度关系的研究. 中国科学(D辑),2005,35(增刊1):20-30.
- [22] Zhou Mingyu, Yao Wenqing, Xu Xiangde, et al. A study on vertical dynamic and thermodynamic characteristics of urban lower boundary layer and its relationship with aerosol concentration over Beijing. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(4):25-37.
- [23] 卞林根,程彦杰,王欣,等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究. 应用气象学报,2002,13(特刊):13-25.
- [24] Gao Zhiqui, Bian Lingen. Estimation of aerodynamic roughness

- length and displacement height of an urban surface from single-level sonic anemometer data. *Australian Meteorological Magazine*, 2005, 53(1):21-28.
- [25] 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 北京与周边地区雾形成的边界层特征. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):73-83.
- [26] Zhang Guangzhi, Bian Lingen, Wang Jizhi, et al. The boundary layer characteristics in the heavy fog formation process over Beijing and its adjacent areas. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):88-101.
- [27] 杨东贞, 于海青, 丁国安, 等. 北京北郊冬季低空大气气溶胶分析. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):113-126.
- [28] 孟昭阳, 丁国安, 于海青, 等. 北京北部城区 SO_2 和 NO_2 垂直分布特点初探. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):109-112.
- [29] 丁国安, 陈尊裕, 高志球, 等. 北京城区低层大气 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直结构及其动力特征. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):31-44.
- [30] Ding Guoan, Chan Chuenyu, Gao Zhiqiu, et al. Vertical structures of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ and their dynamical character in low atmosphere in Beijing urban area. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):38-54.
- [31] 郑向东, 丁国安, 孙敏峰, 等. 北京冬季边界层臭氧垂直分布. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):100-108.
- [32] 郑向东, 丁国安, 于海青, 等. 十三陵“清洁区”秋季 O_3 在地面及近地边界层垂直分布变化的探测研究. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):45-52.
- [33] Zheng Xiangdong, Ding Guoan, Yu Haiqing, et al. Vertical distribution of ozone in the planetary boundary layer at the Ming Tombs, Beijing. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):55-63.
- [34] 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖, 等. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):1-19.
- [35] 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 北京城市热岛“尺度”变化与城市发展. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):97-106.
- [36] 张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):43-50.
- [37] Yu Shuqiu, Bian Lingen, Lin Xuechun. Changes in the spatial scale of Beijing UHI and urban development. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):116-127.
- [38] 徐祥德, 丁国安, 周丽, 等. 北京城市冬季大气污染动力-化学过程区域性三维结构特征. *科学通报*, 2003, 48(5):496-501.
- [39] Xu Xiangde, Ding Guoan, Zhou Li, et al. Localized 3D-structural features of dynamic-chemical processes of urban air pollution in Beijing winter. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(8):819-825.
- [40] 周丽, 徐祥德, 丁国安, 等. 北京地区气溶胶 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子浓度的相关因子及其估算模型. *气象学报*, 2003, 61(6):761-768.
- [41] Zhou Li, Xu Xiangde, Ding Guoan, et al. Diurnal variations of air pollution and atmospheric boundary layer structure in Beijing during winter 2000/2001. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22(1):126-132.
- [42] 施晓晖, 徐祥德, 丁国安, 等. EOF 模型分析北京周边气溶胶影响域气候变化显著性特征. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):206-218.
- [43] Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Zhang Shengjun, et al. Analysis to significant climate change in aerosol influence domain of Beijing and its peripheral areas by EOF mode. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(4):246-275.
- [44] Xu Xiangde, Shi Xiaohui, Zhang Shengjun, et al. Aerosol influence domain of Beijing and peripheral city agglomeration and its climatic effect. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16):2016-2026.
- [45] 郝吉明, 吴烨, 傅立新, 等. 中国城市机动车排放污染控制规划体系研究. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):193-203.
- [46] 郝吉明, 王丽涛, 李林, 等. 北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):115-122.
- [47] Hao Jiming, Wang Litao, Li Lin, et al. Air pollutants contribution and control strategies of energy-use related sources in Beijing. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(4):138-146.
- [48] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):123-130.
- [49] Shao Min, Fu Linlin, Liu Ying, et al. Major reactive species of ambient volatile organic compounds(VOCs) and their sources in Beijing. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):147-154.
- [50] 李晓莉, 何金海, 毕宝贵, 等. MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*, 2003, 61(5):526-539.
- [51] 桑建国, 刘辉志. 街谷环流和热力结构的数值模拟. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):69-81.
- [52] 刘辉志, 姜瑜君, 梁彬, 等. 城市高大建筑群周围风环境研究. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):84-96.
- [53] Liu Huizhi, Jiang Yujun, Liang Bin, et al. Studies on wind environment around high buildings in urban area. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):102-115.
- [54] 刘煜, 李维亮, 周秀骥, 等. 夏季华北地区二次气溶胶的模拟研究. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):156-166.
- [55] Liu Yu, Li Weiliang, Zhou Xiuji, et al. Simulation of secondary aerosols over North China in summer. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):185-195.
- [56] 颜鹏, 黄健. 周边地区对北京地面 SO_2 影响的初步研究. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊):144-152.
- [57] 颜鹏, 黄健, Roland Draxler, 等. 北京地区 SO_2 污染的长期模拟及不同类型排放源应计算与评估. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(增刊 I):167-176.
- [58] Yan Peng, Huang Jian, Roland Draxler. The long term simulation of surface SO_2 and evaluation of source contributions from the different emissions to Beijing city. *Science in China(Series D)*, 2005, 48(Suppl II):196-208.

- [59] 周秀骥,徐祥德,颜鹏. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(D 辑), 2002, 32(4): 327-334.
- [60] 江文华,马建中. 区域化学输送模式中 NO_x 和 O_3 源示踪法的引入. 北京周边地区光化学污染的应用研究. 气象学报, 2006, 64(3): 281-292.
- [61] 朱蓉,徐大海,孟燕君,等. 城市空气污染数值预报系统 CAPPS 及其应用. 应用气象学报, 2001, 12(3): 267-278.
- [62] 朱蓉,徐大海,周朝东,等. CAPPS 在国家气象中心多城市污染指数数值预报业务系统中的应用. 应用气象学报, 2002, 13(增刊): 204-213.
- [63] 沈元芳. 紫外线模式预报方法的研究和实验. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 223-231.
- [64] Xu Jianming, Xu Xiangde, Liu Yu, et al. A Study of statistically correcting model CMAQ-MOS for forecasting regional air quality. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Supp II): 155-172.
- [65] 许建明,徐祥德,刘煜,等. CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正模型预报途径研究. 中国科学(D 辑), 2005, 35(增刊 I): 131-144.
- [66] 杨东贞,徐祥德,刘晓端,等. 密云水库区域大气-土-水污染过程复合相关源. 中国科学(D 辑), 2005, 35(增刊 I): 195-205.
- [67] Yang Dongzhen, Xu Xiangde, Liu Xiaoduan, et al. Complex sources of air-soil-water pollution processes in the Miyun reservoir region. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Supp II): 230-245.

Beijing City Air Pollution Observation Experiment

Xu Xiangde Ding Guoan Bian Lingen

(Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081)

Abstract

The atmospheric part of key project from the National Fundamental Research Planning is introduced , i. e. , “ Air , Water and Soil Environmental Pollution Mechanism and Its Regulating-Controlling Principles in Beijing and Its Ambient Area ”. Beijing City Air Pollution Observation Experiment (BECAPEX) is the most comprehensive field program carried out to date to characterize the air pollution sources and processes in and around Beijing City during the period from 2001 to 2003. A key issue of the BECAPEX experiment addresses is whether the air quality in the Beijing Metropolitan area (BMA) can meet the standards in 2008 set by the Beijing Olympic Organizing Committee by controlling the emissions within BMA. Observations from BECAPEX reveals that the air quality in BMA is a regional problem. Although the reduction of emissions within BMA can generally improve its air quality , under certain weather conditions , the transports by local heat island circulation , synoptic and large-scale winds can carry pollutants from neighboring regions to the south and east of the BMA. These multi-scale transports play a crucial role in determining the air quality in the BMA. Thus , in order to properly address its air pollution issue , Beijing and its neighboring regions must be considered as an integrated system , where pollution control strategies must be formulated synergistically.

Results show that there exists significant difference in the contribution of winter/summer different pollution emission sources to the component character of atmospheric pollution. Surface layer atmospheric dynamic and thermal structures and various pollutant species at the upper boundary of buildings ensembling at urban different observational sites of Beijing in winter and summer show an “ in-phase ” variation and the spatial scale feature of “ influence domain ”. The power spectrum analysis (PSA) shows that the period spectrum of winter/summer particle concentration accords with those of atmospheric wind field. It is found that from analyzing the urban area thermal heterogeneity , the multi-scale effect of Beijing region urban heat island (UHI) is associated with the heterogeneous expansion of the tall buildings area. In the urban atmospheric dynamical and thermal characteristic spatial structures , the turbulent scale feature of the urban boundary layer (UBL) of architectural com-

plexes has an important impact on the multi-scale feature of the urban atmospheric pollution. The comprehensive analyses of the variational analysis field of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) AOD-surface PM₁₀ under the condition of clear sky and the correlation resultant wind vector field for pollution source-tracing suggest that the emission sources for winter Beijing atmospheric pollution aerosols particle might be remotely traced to the south peripheral greater-scale spatial range of Hebei, Shandong, and Tianjin etc. The backward trajectory feature of winter/summer air particles exhibits analogous multi-scale feature, and depicts the difference in the scale feature of the pollution sources spatial distribution in different season. The peripheral source trajectory paths of urban atmospheric pollution (UAP) mainly come from the fixed industrial surface source or heating surface source in the outskirt of Beijing. The high value area of the winter Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) AOD lays in the Beijing region and its south peripheral area, an S-N zonal pattern, which reflects the dynamical effect of peripheral topographic pattern on the diffusion of regional scale atmospheric pollution sources. Study suggests that the extent of winter atmospheric pollution within the "valley" megarelief in Beijing and its periphery is closely related to the pollution emission sources of the south peripheral area; and the significant "anti-phase" variation feature of the winter AOD and sunshine duration in Beijing and its peripheral areas, and the regional scale correlation of low cloud cover, fog days, and aerosols reflect the local climatic effect of aerosol influence in this region. Based on the analysis of the air pollution observational data, several models developed by members of this program are revealed.

Key words : air pollution ;atmospheric environment ;scientific experiment ;air quality ;dynamic and statistic model ; numerical model