

近 30 年大气化学和大气环境研究回顾

——纪念中国气象科学研究院成立 50 周年

丁国安 郑向东 马建中 刘 煜 颜 鹏

(中国气象科学研究院 中国气象局大气成分观测与服务中心
中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要

概述了中国气象科学研究院(简称气科院)近 30 年来有关大气化学和大气环境研究成果。该院完成了国家自然科学基金重大项目和科技部 973 项目等一系列重要研究项目,做出了许多具有重大创新性的成果:在青藏高原发现“臭氧低谷”,这一重大发现列为当年中国 10 大科技成果之一;首次把环境、生态、气候几个重要领域进行综合研究,发现人类活动对环境造成的变化改变了生态环境状态,最终对区域气候造成影响,对北京市大气污染机理和调控原理进行了深入研究,在三维立体观测基础上,提出了点-面结合与统计-动力综合分析、地面观测-卫星遥感分析方法及模式新技术等,获取了解决大气环境领域关键技术难点的创新成果;建立了全球第一个大陆大气本底基准观象台即瓦里关本底台,开创了我国全球大气本底业务观测等。几十年来气科院大气化学研究工作几乎涵盖了当前大气化学所有重要领域及其前沿学科,其中包括温室气体、臭氧和反应性气体、气溶胶、酸雨、模式的发展及应用、空气质量预报技术和环境评价等。气科院大气化学研究工作是和中国气象局大气成分监测站网建设密不可分的,广大科研人员参加了诸如大气本底站网、酸雨站网、臭氧站网、沙尘暴站网等业务站网的建设,与此同时也构建了大气化学科研平台。

关键词:大气化学;大气环境;中国气象科学研究院

引 言

20 世纪 70 年代在原国家气象局气象科学研究院(中国气象科学研究院前身)天气气候所成立了大气污染组,当时主要研究工作是有关工厂的大气污染评估,也承担了一些大气环境的研究工作如本底站的选址和论证,珠穆朗玛峰环境科学考察等。气科院大气化学的研究工作始于 1985 年正式建立大气化学研究室,多年来完成了国家科技部、国家自然科学基金委员会以及国家有关部委的大量研究课题,研究的内容几乎涵盖当前大气化学所有重要领域,以及重要的前沿学科,做出了许多具有开创性的学术成果,逐渐建立起一支在国内外享有盛誉的研究队伍。气科院大气化学研究工作是和中国气象局大气成分监测站网建设密不可分的,广大科研人员参加了诸如大气本底站网、酸雨站网、臭氧站网、沙尘暴站网等的建设,与此同时也构建了大气化学科

研平台,为科学研究提供了大量的科学数据。本文即在此基础上按照大型综合科学试验、臭氧和反应性气体、气溶胶、酸雨、模式的发展及应用、空气质量预报技术和环境评价、中国背景大气成分观测等 7 个部分加以总结。由于温室气体以及城市环境已另文叙述,为此除和本文有联系的个别内容外不再赘述。另外本文主要反映气科院完成的大气化学和大气环境方面科研成果,大型综合科学试验成果极其丰富,涉及到的其他学科,读者可参考本专刊相应综述。

1 大型综合科学试验

从 20 世纪 90 年代起气科院主持了一系列有关大气化学方面重大科研项目,并开展了大型的科学试验,从而使气科院的大气化学研究水平有了质的提高。

1986 年和 1987 年气科院派员分别参加了中美

海气合作 TOGA 计划的海上观测,观测内容包括海洋气溶胶、降水化学和大气臭氧等^[1-2]。

20 世纪 90 年代初气科院和美国 NOAA 空气实验室以及 NASA 合作开展“西太平洋 O_3 及其前体物考察”,该项合作分别在 1991 年 8 月 22 日—11 月 7 日和 1994 年 2—3 月执行(PEM-WEST A 和 B),中方首席科学家为周秀骥院士,美方首席科学家为刘绍臣博士。这是中美两国第一次开展的大型综合性大气化学联合考察,也是我国第一次开展如此大规模的大气化学考察。按照协议美方负责沿西太平洋的空中观测,中方负责临安本底站的强化地面观测。由于我国尚未进行过类似的大型考察,因此通过参加此次国际合作使我们对于区域本底站近地面大气痕量成分基本情况,其中包括源、输送、转化和汇,以及东亚大陆向西太平洋的长距离输送有所了解^[3]。观测结果第一次揭示:临安地面有较高的 O_3 和 NO_x 浓度,在山谷风条件下太阳辐射是控制它们光化学反应的主要因子,生物燃烧是 NO_x 的重要局地排放源^[4-6]。近地层大气 O_3 浓度在弱风条件下主要决定于地面总辐射量控制下的光化学反应过程, O_3 的生成受到前体物 NO_x 的控制,但 O_3 与 NO_x 存在着非线性关系,较高的 NO_x 抑制了过氧基的生成。 $NMHC$ 和 NO_x 的比值比国外同纬度地区高,从而提示临安地区秋冬季 $NMHC$ 不是 O_3 的控制物种^[7]。

1994—1997 年由周秀骥主持进行的国家自然科学基金重大项目“中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响”是我国第一次对大气臭氧长期、全面和系统的研究。气科院大气化学研究室投入了大部分研究力量,分别参加了我国大气臭氧及其前体物与气溶胶基本特征观测研究、我国大气臭氧变化机理的数值模式研究以及我国大气臭氧变化趋势及其对气候环境生态影响预测研究。该项研究最重要的成果是发现了青藏高原上空夏季(6—9 月)存在大气臭氧低值中心,6 月份该中心臭氧柱总量月平均值比全球同纬度平均值要低 11% 左右,臭氧低值中心逐年在加深,平均年递减率高达 0.35%。这一重大发现列为当年中国 10 大科学成果之一。通过数值模拟试验揭示了青藏高原夏季大气臭氧低值中心形成机制、地面臭氧变化机理,证实了东部地区地面臭氧变化主要决定于太阳辐射控制下与有关前体物的光化学反应过程^[8]。该项研究还揭示了地面臭氧和有关前体物(CO 、 NO_x 、 CH_4 、 SO_2 和气溶胶)季节变化和日变化特征与规律。观测结果表明,我国

人类活动对于局地地面大气臭氧与有关前体物变化的影响是显著的。同时对国际协议规定的控制氟里昂排放的不同情况,进行了数值模拟试验,对大气臭氧未来变化趋势提出了预测性意见^[9-10]。

作为以上项目的匹配课题由李兴生主持的中国气象局“八五”重点课题“我国大陆和西太平洋地区大气痕量气体及其他化学物质的监测和研究”进行了瓦里关山大气基准站的大气痕量气体和其他化学成分测量及其变化规律的研究,以及我国东部和西太平洋地区大气痕量气体和其他化学成分的测量及其变化规律的研究。

“九五”期间(1998 年 4 月—2004 年 7 月)首席科学家周秀骥主持完成了国家自然科学基金重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用”。而以美国佐治亚理工学院 Chameides W. L. 教授(美国科学院院士)为首科学家的专家们也制定了长江三角洲地区的中国城乡复合体研究计划(China-map),并与气科院签订了合作研究协议。两个研究计划的共同目标都是以长江三角洲地区低层大气物理化学过程与生态系统相互作用为核心科学问题,研究揭示地表结构变化与区域气候和环境变化的相互影响,探索区域社会、经济建设与生态、环境协调发展的对策。显然,这个研究目标对全球变化研究和长江三角洲地区社会经济发展都具有重要的理论意义和应用价值。气科院承担了该项目的大部分课题。该项目首次把环境、生态、气候几个重要领域进行综合研究,发现人类活动对环境造成的变化改变了生态环境状态,最终对区域气候造成影响^[11]。

由首席科学家徐祥德主持的科技部 973“首都北京及周边地区大气、水、土环境污染机理及调控原理”大气分项目,项目执行时间 1999 年 12 月—2005 年 10 月。2001 年和 2003 年在北京城区和近郊区实施了冬、夏两季大气动力-化学综合观测试验(BE-CAPEX: Beijing City Air Pollution Experiment),即点-面相结合的卫星遥感-地面综合探测。项目共进行了 11 期综合观测,初步建立了城市边界层大气动力-化学过程综合观测数据库。该项目着重对北京市大气污染机理和调控原理进行了深入的研究,在三维立体观测基础上,提出了点-面结合与统计-动力综合分析、地面观测-卫星遥感分析方法及模式新技术等,获取了解决大气环境领域关键技术难点的创新成果,并应用在全国范围空气质量预报及部分城市

建筑规划等方面^[12]。

从 2006 年 9 月开始由张小曳为首席科学家主持了科技部 973 项目“中国大气气溶胶及其气候效应的研究”。该项目旨在取得对中国大气气溶胶特性、分布和变化的准确与系统的科学认识;认识区域大气灰霾的形成机理,提出数值预报方法;了解中国的大气气溶胶在气候变化中的作用。目前项目正在做前期准备工作。

2 臭 氧

2.1 臭氧总量及边界层臭氧垂直分布

气科院开展臭氧总量的监测研究始于 20 世纪 80 年代中期发现南极“臭氧洞”的背景下。薛庆渝具体负责开展了测量大气臭氧和二氧化氮柱总量的“太阳和天光光度计”研制工作。该仪器于 1989 年研制成功。它利用了直射太阳光和天顶散射光测量大气中的臭氧和二氧化氮总量。仪器的各项技术性能指标均达到设计的要求;在臭氧总量方面与 Brewer 臭氧光谱仪和 Dobson 臭氧总量测量仪器测量结果比较一致^[13]。

从 20 世纪 90 年代开始,郭松、郑向东等使用世界气象组织推荐的全自动的 Brewer 臭氧分光光谱仪开展了臭氧总量的业务监测。第一台臭氧分光光谱仪 Brewer #054 号是 1990 年 10 月在全球环境基金支持下引进的。该仪器在北京做短暂的观测之后,于 1991 年 9 月在青海省共和县(36.267°N,101.617°E)开展观测,1993 年 8 月移到瓦里关山全球大气本底站(36.287°N,101.898°E)开展业务监测至今。1993 年中国气象科学研究院开始在南极中山站(69.37°S,76.38°E)布设 Brewer #074 仪器,启动了我国在南极地区臭氧总量长期的观测工作,这对进一步研究东南极地区的“臭氧洞”的变化规律以及在“臭氧洞”背景下的 UV 辐射增强的规律性提供了十分重要的基础^[14-16]。1993 年 8 月后分别利用 Brewer #076 和 Brewer #077 仪器,在黑龙江省龙凤山区域大气本底站(44.73°N,127.60°E)和浙江省临安区域大气本底站(30.30°N,119.75°E)开展业务型的臭氧总量观测。气科院负责运行的国内 3 个站点的臭氧总量的观测与中国科学院设在云南昆明(25.03°N,102.68°E)和河北香河(39.98°N,116.37°E)两个以 Dobson 仪器观测臭氧总量的站组成了中国大陆地区的臭氧总量观测站网。在中国气象局的支持下,中国大陆地区第 4

个业务型的臭氧总量观测站,设在西藏拉萨(29.67°N,91.13°E),计划于 2007 年开展业务观测。

中国气象局 3 个站点臭氧总量日平均值,每年定期报送给世界气象组织设在加拿大世界臭氧和 UV 数据中心(WOUDC),以供全球科学家使用。这些站点的数据已在检验卫星反演臭氧总量数据方面发挥了重要的作用^[17]。利用这些观测结果,气科院也开展了一些相关的研究工作,包括利用 Brewer #054 仪器在青海观测到因 1991 年皮纳图博火山的喷发造成 1992—1993 年全球性的臭氧减少背景下的 UV 辐射增加的现象^[18],Umkehr 廓线反演的臭氧垂直廓线与臭氧探空观测结果的比对等^[19]。青海瓦里关、黑龙江龙凤山、浙江临安和南极中山站 4 个站点十多年来臭氧总量存在下降趋势。

利用卫星观测是研究臭氧总量分布变化特征另一个有效的途径。其中最具有影响力的工作是周秀骥等人分析 TOMS 的卫星观测发现青藏高原“臭氧低谷”的现象及其长期变化的趋势^[20],这一重大发现列为当年中国 10 大科技成果之一。“臭氧低谷”的出现促使了大气科学界对青藏高原主体地区的臭氧问题的持续关注^[21-22]。1998 年汤洁、郑向东等在拉萨地区开展大气臭氧^[23]、气溶胶^[24]的综合观测实验便是在此背景下开展的相关课题。在这次观测中,科学家注意到拉萨地区的对流层臭氧与同纬度其他地区(如日本的 Kagoshima 站)对流层臭氧相比,有着显著的低值特征^[23]。通过有关的数值模拟进一步对“臭氧低谷”形成的机理进行了研究^[25-27]。

有关臭氧探空的观测研究始于 1995 年。刘奇俊、郑向东等在中国气象局的支持下,利用芬兰 Vaisala 公司提供的电化学电池型臭氧探空仪在青海西宁开展了臭氧垂直廓线的观测研究^[28]。首次揭示了夏季西北地区自由对流层中臭氧浓度的垂直分布变化与天气尺度的平流层向下输送或与源自海洋边界层低臭氧浓度的远距离输送、强对流层活动有着密切的联系^[29-30]。

郑向东独立或与相关研究单位合作,还在其他地区开展了臭氧探空的观测研究。这些工作包括 2001 年春季在临安、昆明^[31-32],2002 年 1 月在西宁、北京^[33],2004 年春季在腾冲(25.01°N,98.30°E)、三亚(18.14°N,109.31°E)、香港(22.38°N,114.33°E)、临安、台北(24.98°N,121.43°E),2005 年春季在阿勒泰(47.73°N,88.08°E)、西宁、北京(39.80°N,116.18°E)

和龙凤山开展的臭氧垂直分布的探空强化观测试验^①。观测结果揭示了不同地区的臭氧垂直分布的特征,尤其是春季自由对流层臭氧垂直结构与天气尺度下的平流层向下输送有着密切的关系。临安(含临安在内)以北站点此特征尤其明显;生物质燃烧产生的污染物的远距离输送对昆明、腾冲等纬度较低站点自由大气中的臭氧增强有着密切的联系。在北京、临安等经济比较发达地区,近地面边界层 2 km 范围内,臭氧浓度的垂直分布显著受到人为污染的影响^[31]。根据中国气象局计划,2007 年气科院拟在北京和拉萨建立两个业务型的臭氧探空站,开展大气臭氧垂直分布的长期观测。近年来利用系留气艇携带臭氧探空仪对边界层臭氧垂直分布开展了观测研究,获取了北京地区冬季、秋季和夏季边界层臭氧高分辨率的数据资料,揭示了不同季节典型城市和郊区边界层内,因光化学污染造成的臭氧产生和损耗而引起的臭氧垂直分布过程及特点^[34-36]。

2.2 近地面臭氧

在关心平流层臭氧减少的同时,由于对流层臭氧浓度的增高而导致大气氧化能力增加的事实也日益引起人们的关注。从 PEM-WEST 到国家自然科学基金重大项目“中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响”,继而另一个国家自然科学基金重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用”等,几个项目分别在长江三角洲地区、临安、龙凤山、瓦里关等地进行了 1 年以上地面臭氧及其前体物的观测和研究,并有一批近地面臭氧论文发表,结果表明本底条件下临安和龙凤山地面臭氧四季有明显的日变化,而瓦里关日振幅很小,仅在夏天有微弱日变化,而且夏天瓦里关地面臭氧浓度比其他两个站要高出 20×10^{-9} 。太阳辐射和 NO_x 是控制临安和龙凤山的决定性因子^[37-42]。研究还表明地面臭氧和气象条件有关,阴天地面臭氧的日较差明显低于晴天^[43-46]。北京郊区地面臭氧浓度偏高的主要原因是城区夜间 NO 浓度很高,从而消耗了大量臭氧所致^[47]。利用 TORS 卫星有关对流层 O_3 柱总量数据和地面臭氧之间的关系的研究工作也正在进行^[48]。

陆龙骅、卞林根等利用中国首次北极和第 16 次

南极考察获取的从 75°N 到 70°S 海洋表面臭氧观测资料,从总体上说北半球地面臭氧浓度高于南半球,且臭氧高值区都在轨迹靠近大陆地区。北半球臭氧日振幅大于南半球,低纬是臭氧日振幅最大地区,极地日振幅最小^[49]。

在国家自然科学基金资助下,郑向东与中国科学院有关单位合作,在瓦里关山站开展了 ^7Be 和 ^{210}Pb 同位素的观测,揭示了对流层上部或平流层下部向下输送对高原地区近地面臭氧收支平衡的重要贡献^[50]。

2.3 反应性气体

地面臭氧观测的同时往往伴随着 SO_2 、 NO_x 等前体物的同步观测以及 NMHC、 H_2O_2 等的采样观测,有关这些反应气体的时空分布规律也多有报道^[39,51-55],并发现有关臭氧及其他反应性气体在城市冠层中有很好的同位相变化特征,其为城市空气质量预报的开展,奠定了实验基础^[56]。由于瓦里关处于欧亚大陆本底环境条件下, SO_2 、 NO_2 浓度低于常规商业仪器下限,为此于晓岚、汤洁等建立了膜采样系统测定上述痕量气体^[57]。值得一提的是受仪器设备的限制,孟昭阳等将无动力 SO_2 、 NO_2 被动采样器在城市环境的铁塔观测中得到了应用,其对于大气环境的研究不失为一种手段^[58]。甲烷(CH_4)既是主要的温室性气体,也是重要的反应性气体,其 70% 来源于天然排放。 CH_4 主要的汇是大气光化学反应。王木林等曾从 1987 年起开始对流层 CH_4 进行观测研究,获取了不同地理生态环境下的 CH_4 浓度和变化规律^[59-60]。此后对我国西、南部高海拔地区 CH_4 浓度分布特征,五台山、庐山的季节性变化,新疆古尔班通古特沙漠从地面到 4000 m 梯度浓度分布特征进行了观测研究^[61]。

有关反应性气体的通量研究也曾做过几次重要的试验。1990 年王木林、邵志清等使用梯度法于临安气象站对当地晚稻进行为期一个生长季的 CH_4 通量观测,同时用箱式法作了对比观测,了解到不同天气条件下 CH_4 垂直分布及通量特征变化,发现箱式法比梯度法明显偏高^[62-63]。此后徐晓斌曾在德国学习期间同样使用梯度法参加森林中 COS 通量的观测研究,发现稳定边界层条件下 COS 浓度随高

① Chan C Y, Lee Y S, Zheng X D, et al. Anthropogenic and stratospheric sources of tropospheric ozone over China during an intensive ozonesonde campaign in the spring of 2004 and 2005. Submitted.

度增加而下降^[64]。1999 和 2000 年丁国安、刘晶淼和颜鹏等连续两年在中国科学院南京土壤研究所常熟生态站利用条件采样法(累积涡动法)进行了水稻不同生长季 N_2O 和 VOC 的通量观测,长期以来国内都是使用箱式法或用梯度法进行 CH_4 、 N_2O 的观测,这是国内第 1 次使用条件采样法进行大气痕量气体通量的观测研究,研究结果表明用条件采样法观测到的 N_2O 垂直通量大于国内用箱式法观测报道的土壤 N_2O 排放通量^[65]。

3 大气气溶胶

3.1 沙尘暴

20 世纪 90 年代初沙尘暴频发,引起了沙尘气溶胶研究的热潮。杨东贞等参加了科技部“八五”攻关课题“西北地区沙尘暴的研究”,在 14 个站点使用随着沙尘暴的移动而采集沙尘气溶胶样品方法,进行较长期的观测研究。有关沙尘气溶胶的理化特性(包括质量浓度(TSP)、元素组成、源的性质、离子浓度及沙尘在水体污染过程中的作用等)进行了大量的观测研究。分析结果表明沙尘样品中地壳元素为主,样品中元素主要来自天然源,沙尘暴的 TSP 浓度 10 倍于正常情况下 TSP 浓度。由于沙尘暴天气过程大气对污染物的输送和扩散能力强,人为污染元素浓度明显下降^[66-72]。其对强沙尘暴的移动、沙尘的输送、沉降、影响范围及包括源地的追溯进行了分析。确认了我国沙尘暴路径以西北—东南向为主,但仍有西北偏北、西北偏西、西向东等路径之分,揭示了进入北京的路径还有西北转西南路径等^[73]。研究了沙尘暴变化趋势^[74]。近年来周秀骥、徐祥德和颜鹏等对沙尘暴的研究有了进一步的进展,主要表现在综合分析研究春季影响北京地区沙尘暴天气过程中,突出了沙尘暴在起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中的关键动力学问题。研究结果表明,2000 年 3—4 月份影响北京地区沙尘暴过程起沙的动力条件与春季冷空气活动等气候因素有关,并与北方土壤干土层面积、地面风场摩擦速度呈异常显著相关。沙尘暴活动特征可用起沙—扬沙—远距离输送综合物理模型来描述^[75]。

3.2 大气气溶胶

与沙尘暴气溶胶研究同时,温玉璞、杨东贞、徐晓斌等也对我国本底条件下气溶胶的理化特征进行了观测研究。对瓦里关、临安、龙凤山 3 个本底站秋

冬季气溶胶中质量浓度和可溶性离子做了比较,发现瓦里关浓度最低,龙凤山其次,临安最高^[76-78]。对临安站气溶胶的进一步研究表明,气溶胶的质量浓度有所下降,但细粒子($d < 2.1 \mu\text{m}$)的比例增加,源具有一定的稳定性,粗粒子($d > 2.1 \mu\text{m}$)和细粒子的元素源基本相同等^[78]。瓦里关大气气溶胶以土壤和地壳等自然源为主,自然源贡献占因子分析的方差百分数 70% 以上,燃煤、交通及冶炼等人为源也占有一定比例^[79]。陆地和海洋气溶胶的对比观测研究结果表明,海洋气溶胶中地壳元素和污染元素,在大于 $4.7 \mu\text{m}$ 和小于 $0.65 \mu\text{m}$ 粒径上的相对浓度都比上甸子高。上甸子本底站气溶胶浓度基本上反映了北京气溶胶的背景特征^[1 80]。

近年有关黑碳气溶胶的观测研究也在进行,汤洁等观测到瓦里关地区春季黑碳气溶胶本底浓度相对其他季节来说,不仅浓度值高,而且逐年增加的趋势更加明显,该地区全年黑碳气溶胶浓度的增加主要来自于春季的贡献。由于瓦里关地区在春季受到东部兰州、西宁等地区污染物输送的影响,因此,瓦里关地区春季黑碳气溶胶浓度增加更大程度上是由于我国西部城市污染区排放增加造成的^[81]。另外在西藏拉萨、四川温江、北京上甸子和浙江临安等地区曾有一些间断的黑碳气溶胶观测结果^[82]。

游来光等研究了气溶胶和大气中冰核的关系:利用毕格型混合云室于 1995 年和 1996 年春季在北京西郊观测了 4 种温度条件下的大气冰核浓度,与 1963 年同种方法观测结果比较,发现 30 年来冰核浓度平均约增加了 15 倍。根据严重污染天气条件下能见度与冰核浓度的正相关分析结果,及冰晶浓度与云中气溶胶粒子浓度两者之间也有较好的正相关关系,结合高冰晶浓度常对应应有较窄的粒子谱和较小的浓度峰值直径,由于人为源形成的气溶胶多为小粒子,由此推测人类活动是北京冰核浓度增加的主要原因^[83]。

有关气溶胶的研究近年来得到较大的发展,颜鹏等从过去单纯关注气溶胶理化特征发展到包括理化和辐射特性及其气候环境效应的综合研究。在浙江临安观测到的一次沙尘暴过程分析结果表明,受北方沙尘暴天气影响,临安气溶胶质量浓度、离子、元素浓度有明显的尺度分布演变,沙尘影响前和结束后临安地区气溶胶主要以细粒子为主($d < 2.1 \mu\text{m}$),峰值粒径大约 $0.65 \sim 2.1 \mu\text{m}$,而受北方地区的沙尘暴影响,峰值粒径偏移到了 $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$,且在 $7 \sim 11 \mu\text{m}$ 间

出现另一个峰值。在整个观测期间 SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 在细粒子段有很好的-致性,而 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 与 Ca^{2+} 在粗粒子段有很好的相关,尤其是沙尘影响期间 NO_3^- 与 Ca^{2+} 有很好的对应关系,表现出较明显的表面非均相反应特征。四季中 PM_{11} 均占气溶胶总量的 90% 以上, $\text{PM}_{2.1}$ 占到气溶胶总量的 53% 以上。可溶性离子在粒径 $< 2.1 \mu\text{m}$ 气溶胶颗粒中,以 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 为主。含碳颗粒物尺度分布特征为颗粒越小,有机碳及元素碳浓度越高^[84-85]。上甸子吸收、散射系数的逐日变化主要受天气过程的影响较大。整个观测期间日平均散射系数(括号内为标准差)为 174.6 mm^{-1} (189.1 mm^{-1}),吸收系数 17.5 mm^{-1} (13.4 mm^{-1}),单次散射反照率 SSA 为 0.88 (0.05)。与 Bergin 1999 年 6 月在北京市区观测的结果相比,上甸子散射系数大约是北京市区观测结果的三分之一,吸收系数大约是四分之一,单散射反照率则高出 0.07。本观测获得的气溶胶单散射反照率与 AERONET 反演得到的北半球平均单散射反照率 0.85~0.95 比较一致,但比 Menon 用 GISS 气候模式研究中国、印度 BC 气溶胶气候效应中采用的 SSA 数值 0.85 偏高^②。开展了湿度影响气溶胶散射系数的试验,在北京市区中国气象科技大楼顶的初步试验显示,冬季气溶胶散射系数随湿度的变化,当湿度从低于 40% 增大到 93% 时,平均气溶胶散射系数亲水增长因子可达 2.10,在相对湿度为 80% 时,平均散射系数亲水增长因子 f (相对湿度为 80% \pm 1%,括号中为标准差)大约为 1.26 (0.15)。按照污染情况和天气过程把观测期间划分为“相对污染”时段和“清洁”时段,在“相对污染”情况时,北京市区测点观测的气溶胶散射系数增长因子 f (相对湿度为 80%) 大约为 1.48,而在“清洁”时段约为 1.2^③。

杨东贞等研究了 TSP 和细粒子随高度变化特征,结果表明:TSP 和元素的浓度随高度下降,气溶胶 70% 浓度分布在细粒径中^[86]。丁国安等研究表明气溶胶浓度随高度分布大致分为两种类型:渐递减型和快速递减型,它与天气和污染状况密不可分。观测还发现 320 m 高度气溶胶浓度与偏东南和西南风有密切关系,使用 footprint(足痕法)分析了

北京市周边污染源影响域,此外还观测到了不同高度 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 有同位相变化特征^[87-88]。

有关气溶胶的分析徐祥德等还引进了一维空间 EOF 主成分分析模型^[89-90],和功率谱统计分析方法,以及利用 MODIS 和 TOVS 卫星资料结合地面观测变分方法分析气溶胶浓度的区域分布特征,和点-面结合方法研究周边污染源对北京市的影响^[91-93]。初次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,可以为设计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。

有关我国气溶胶浓度逐年增加的结论还来自于罗云峰和周秀骥等人的研究工作。他们利用北京等 46 个甲种日射站,1961—1990 年逐日太阳辐射日总量和日照时数等资料,反演了 30 年来各站逐年,逐月 $0.75 \mu\text{m}$ 大气气溶胶光学厚度平均值,分析结果表明 20 世纪 60 年代我国大气气溶胶光学厚度平均值在 100°E 以东以四川盆地为大值中心向四周减少, 100°E 以西以南疆盆地为中心向四周减少。到 70 年代绝大多数大气气溶胶光学厚度平均值增加,从四川盆地到长江中下游地区以及华南沿海等地增加尤为明显,到了 80 年代我国大范围地区大气气溶胶光学厚度平均值呈增加趋势,其中长江中下游地区增加明显而且分布也发生了一定变化^[94]。该项研究成果还同时总结了大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状,指出人类活动产生的气溶胶具有与 CO_2 温室气体大小相当,符号相反的辐射强迫效应^[95]。徐祥德和施晓晖等对气溶胶与北京地区区域气候影响也进行了研究,发现气溶胶高值区内冬季日照时数减少、低云量和雾日数增多,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。尤其 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。北京城市周边南部河北、山东等省各站低云量与气溶胶指数呈

② 颜鹏,潘小乐,汤洁,等.北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究.待发表.

③ 颜鹏,黄健,汤洁,等.京津地区典型区域大气气溶胶光学特性观测研究.待发表.

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^[96-97]。

李兴生、杨东贞等参加了由美国 NOAA Farn Parungo 负责的“亚洲沙尘暴对辐射及气候影响”项目,该项目在北京进行了几年的观测研究。针对沙尘气溶胶的物理、化学及光学特性进行了研究,讨论了沙尘气溶胶的抬升、输送及成云过程,并进行了沙尘暴辐射影响的研究,包括直接影响和间接影响^[98]。

由马建中承担的国家自然科学基金重点项目“华北地区大气污染对气溶胶和云微物理特征的影响”,拟通过观测事实揭示华北地区大气污染对气溶胶和云微物理特征的影响,发展华北地区高分辨率的大气化学、气溶胶和云微物理过程的耦合模式。现已完成飞机和地面综合观测试验,正在对外场资料进行分析之中。

4 酸 雨

自 20 世纪 60—70 年代以来,由于欧洲工业飞速发展,大量污染物排入大气,最终形成了酸雨,其给人类的生活环境带来日益严重的污染与破坏,使人们的健康受到严重威胁。1981—1983 年期间,由李洪珍、王木林等在全国建立了 40 余个酸雨观测站,首次开展了我国酸雨的普查,得出长江以南是我国主要酸雨区的初步结论。自此之后有关酸雨的调查和研究在全国普遍开展起来^[99-101]。

20 世纪 80 年代末进行了酸雨形成机理的进一步研究,丁国安、房秀梅、吴凡、汤洁等分别于 1987 和 1988 年在庐山 3 个高度:70 m,1100 m 和 1400 m 开展了降水化学垂直分布的观测研究,观测项目包括云雾水、雨水以及 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、气溶胶和气象观测等。观测结果表明:庐山大气降水中离子浓度随高度降低而升高,但 pH 值减小,锋面过境降水与变性高压西南侧降水中各种离子浓度以及山下与山上测点离子浓度相比有明显差异,这可能与气流来向和污染源的分布有关。气溶胶对降水中 SO_4^{2-} 贡献为 91.0%。不同气流来向影响气溶胶浓度。不同天气过程,不同离子的云下冲刷过程是不同的^[102]。云雾水和同一地点采集的雨水相比,除 Cl^{-1} 外各种离子浓度都高于后者,pH 值也较高。云雾水和地面同时段采集的雨水相比,pH 值也较高,云雾水中 NO_3^{-1} 、 SO_4^{2-} 离子浓度^[103]、 NH_4^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子浓度

也较高,但不如云雾水和同一地点采集的雨水差异那么大。云雾水中离子浓度和上风方污染源关系密切,其主要通过气溶胶的输送而影响云雾水成分。有雨情况下云雾水的离子浓度随时间推移而逐渐减少^[103]。有关雨雾水、雨水研究结果显示,云、云雨滴离子浓度和酸度与其大小、含水量、谱宽呈反相关,为此影响了降水云和非降水云的酸度和离子浓度^[104]。

丁国安、徐晓斌等人在“八五”酸雨攻关项目中对我国湿沉降时空分布特点进行了系统的、全面的观测研究。其主要在中国气象局中已有的包括 78 个酸雨站进行了降水中 pH 值降水化学(NO_3^{-1} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^{+} 、 Ca^{2+} 离子浓度)的观测分析,并进行了 SO_2 和 NO_2 的观测分析。研究了我国降水 pH 值月、季、年的分布特征, NO_3^{-1} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^{+} 、 Ca^{2+} 离子浓度的季、年的分布特征, SO_2 和 NO_2 的月、季、年的分布特征,以及 H^{+} 、 NO_3^{-1} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^{+} 、 Ca^{2+} 湿沉降通量的季、年分布特征。分析了我国南方和北方降水化学的特点,发现我国酸雨中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^{-1}$ 的比值全国平均值为 6 左右,表明我国降水基本上属于硫酸型,在南方高硫煤地区可大于 10,大城市周围由于汽车排放的 NO_x 增加,降水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^{-1}$ 比值可小于 4。降水中 $\text{NH}_4^{+}/\text{Ca}^{2+}$ 值南方一般大于 1,北方则小于 1。研究表明我国酸雨是很严重的,不仅在亚洲居于首位,而且中国南方酸雨区是继欧洲和北美之后的全球第三大酸雨区^[105-108]。

上述“八五”酸雨攻关项目研究也包括了我国酸雨发展趋势的探讨,发现从 1986—1995 年 10 年间我国酸雨发展日趋严重,酸雨面积逐渐扩大,南方部分省市出现年平均 pH 值小于 4.0 的地区,酸雨出现频率也逐年上升^[105-108]。到 21 世纪初(2002 年)年平均 pH 值与 1993—1995 年平均 pH 值相比,其东部略有南缩趋势,表现在东北地区已缩小为低于 5.6 的局部片状地区,华北地区缩为山西南部地区,河北及山东地区缩为山东半岛及环渤海湾地区;其中部分呈略向南缩态势,西部没有明显变化。长江以南酸雨形势变化不大,其年平均 pH 值都继续维持低于 5.6 的状态。年平均 pH 值低于 4.5 的地区仍在重庆、四川、贵州、湖南等大部分地区,而且此范围有扩大趋势,另外,在浙江部分地区年平均 pH 值也继续在 4.5 以下,两广酸雨区稍有缩小,个别重酸

雨区依然出现在长江以南地区^[107-108]。总之,在 1993—2002 年 10 年间我国酸雨状况基本趋于稳定,东北、华北地区略有好转,长江以南仍为我国主要酸雨区,而且长江以南个别地区酸雨有明显加重趋势^[107-109]。但不容忽视的是我国部分地区,特别是北方地区 2005 年有部分测站年平均降水 pH 值显著降低^[110]。

关于我国大气本底条件下大气降水酸度是人们共同关心的问题。于晓岚、汤洁等研究了青海瓦里关本底站降水,得到了从 1996—2000 年 5 年降水 pH 值的雨量加权年平均为 5.93,从统计结果看,降水 pH 值低于 5.6 的占 6.0%,而降水 pH 值低于 5.0 的占 1.7%,降水 pH 值大于 5.6 的占 94.0%。所有 pH 值主要集中在 6.0~7.0 之间,约占总数的 75.4%,有 18.6% 的降水 pH 值大于 7.0^[111]。1998 年于晓岚负责在中国南极长城站进行了大气降水化学特征的观测研究,结果表明:年平均 pH 值为 5.62,电导率年平均值为 85.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。降水中最主要离子为 Cl^- , Na^+ , 其他离子按平均浓度值依次排序为 SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , NO_3^- , NH_4^+ , 降水样品的离子组成比例与周围海区的海水接近,显示了海盐是降水中可溶性离子的主要来源,该地区的降水具有较典型的海洋性降水的化学特征^[112-113]。杨东贞、丁国安等分别分析了 3 个区域本底站的降水化学资料,结果表明:年平均 pH 值在这十几年中有了明显的下降,因为龙凤山没有 20 世纪 80 年代资料,所以从资料记录较长的临安和上甸子来看,以 20 世纪 80 年代和 90 年代初降水年平均 pH 值下降得最为明显,90 年代中期北方两个区域本底站(上甸子、龙凤山)降水年平均 pH 值年变化相对稳定,而南方区域本底站(临安)降水酸性依然呈上升趋势。进入 21 世纪 3 个区域本底站的降水年平均 pH 值和 20 世纪 90 年代末相比基本持平或略有下降。总的来看十几年来我国东部地区酸雨呈持续发展趋势,20 世纪 90 年代中后期以来酸雨发展略趋于稳定,但我国总的酸雨形势不容乐观^[108-109]。在 1986 年 11 月—1987 年 3 月 TOGA(中美海气合作)考察中进行了有关海洋降水化学科学试验,发现海洋降水中 Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等离子主要来自降水对海洋气溶胶的淋洗与冲刷^[2]。

从 2005 年起气科院徐晓斌承担了国家科技部 973 酸雨项目第一课题“我国酸沉降相关物质的排放特征及强度研究”。其主要研究内容为建立

NO_x , NH_3 , 盐基阳离子和 VOC 排放量的科学估算方法并利用反推模式进行合理性检验,建立酸沉降相关污染源动态排放清单并预测未来排放趋势。开展我国酸雨污染现状及酸雨化学成分时空分布调查和全面分析,结合卫星遥感技术对大气颗粒物与气态污染物的时空分布进行反演,建立酸沉降时空演变数字化显示系统和酸沉降污染信息数据库。目前该课题正在进行之中。

5 模式的发展及应用

5.1 硫循环和酸雨

李兴生、郑敏等建立了一维光化学模式,研究在不同条件下 DMS 及其在大气中经氧化形成的 SO_2 , H_2SO_4 和 MSA ($\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$) 的垂直浓度分布和时变规律。模式的高度范围是从海洋表面到边界层顶,垂直湍流扩散采用参数化方法,涉及的化学反应有 53 个。DMS 海-气通量由“stagnant-film”模式进行计算,计算结果与 PEM-WEST A 的观测资料有较好的一致性。模拟研究显示 DMS 与 OH 反应、 SO_2 的非均相化学转化过程、 NSS-SO_4^{2-} 及 MSA 的非均相清除速率以及干沉降速率,是控制污染海洋大气中 NSS-SO_4^{2-} 及 MSA 浓度及分布的关键因素;尽管海洋大气中 OCS 浓度比 DMS 大一个量级,但它对 SO_2 的贡献很小, DMS 仍是大气中 SO_2 的主要源^[114-116]。

以上项目组成员还利用平流输送、湍流扩散、气相化学反应、液相化学反应以及干湿沉降过程的三维欧拉型模式,对中国地区大气对流层 SO_2 和 SO_4^{2-} 的演变和输送机制进行了模拟。模拟的水平范围从 $19^\circ\sim 50^\circ\text{N}$, $65^\circ\sim 125^\circ\text{E}$, 网格精度为 $90\text{ km}\times 90\text{ km}$, 垂直方向分为 15 层,模式顶部取在 50 hPa。通过冬、夏两季的个例模拟分析表明,冬夏 O_3 , H_2O_2 和其他污染气体浓度分布存在明显的差异,由此而引起 SO_4^{2-} 的非均相和均相氧化反应随季节发生明显变化,从而使 SO_4^{2-} 的地面浓度分布冬夏之间并不完全一致^[117]。

刘奇俊等建立发展了一个一维暖性层状云系的气溶胶清除和降水云化学模式,考虑到云下雨滴的蒸发效应,将模式发展成为适用于云内和云下过程的时变模式,且引入了 O_3 的液相氧化和气溶胶粒子的核化、布朗湍流碰并、被雨滴的动力捕获及其在

云、雨滴中的微物理转化。模式旨在研究云雨酸化机制及 SO_2 、 HNO_3 和 H_2O_2 的云内雨清除和云下冲刷清除过程。模式结果在一定程度上与庐山地区的观测资料相符^[118-119]。

5.2 区域臭氧

罗超等^[120]引入改进了区域酸沉降模式 RADM, 并将其发展成适用于包括中国东部在内的东亚地区三维区域化学输送模式。模式在垂直方向分 15 层, 水平网格为 70×70 , 网格大小为 $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ 。他们模拟研究了臭氧及其前体物的分布和变化机制, 并与 PEM-WEST A 的观测资料进行了对比分析, 结果显示臭氧的生成受 NO_x 的控制, 两者之间存在复杂的非线性关系。

杨昕和李兴生^[121]将区域酸沉降模式 RADM 的模拟范围集中于中国大陆地区, 发展了中国地区三维区域化学输送模式。模式网格距为 $90 \text{ km} \times 90 \text{ km}$, 采用了白乃彬给出的中国大陆 1992 年的 NO_x 和 SO_2 的源排放资料。他们模拟研究了近地面臭氧及其主要前体物 NMHC、 NO_x 、CO 等之间的复杂关系, 主要结论为污染地区近地面 O_3 变化主要受光化学作用控制, 而清洁地区 O_3 变化主要受大气背景 O_3 浓度影响。

王喜红和李兴生^[122-123]用中国地区三维区域化学输送模式对冬夏不同季节大气对流层臭氧的时空分布和输送机制进行了模拟, 发现在夏季青藏高原中低空存在很强的辐合气流, 造成高原上空中低层 O_3 浓度比周围高, 而高空受南亚高空控制, O_3 浓度向周边辐散。青藏高原地区地面 NO_x 浓度极低, 光化学反应生成 O_3 不显著。

马建中等对中国地区三维区域化学输送模式做了进一步发展, 改进了化学机理, 发展了中国地区上空飞机的排放源清单^[124], 将在线的闪电 NO_x 源加入到模式中, 考虑了非甲烷挥发性有机物的天然源排放, 考虑了上边界(对流层顶)的物质交换, 用全球化学输送模式 MOZART 的结果作为模式的侧边界条件, 并通过与中国区域本底站的臭氧及其前体物观测数据、日本的臭氧探空资料以及 MOZART 在中国地区的模拟结果相比较, 对模式做了系统全面的评估。还将 O_3 的示踪物加入到模式中, 分别模拟由平流层—对流层交换、侧边界输入以及通过 NO 的当地光化学反应引起的 O_3 浓度分布, 并进一步将 NO_x 的示踪物加入到模式中, 分别模拟由地表排放、航空排放、生物源和 LBI 引起的 NO_x 和 O_3 的

浓度分布。结果显示, 瓦里关臭氧主要来自侧边界即中国地区以外的远距离输送, 在龙凤山臭氧主要是由区域内的光化学反应生成的, 而临安臭氧白天主要是由区域内的光化学反应生成的, 夜间主要来自侧边界即中国地区以外的远距离输送^[125-128]。

江文华等^[129]进一步将区域重点源示踪法引入化学输送模式, 对太原和石家庄地表排放产生的活性氮化物和它们所产生的臭氧对北京的影响进行了模拟研究。计算结果表明, 在晴朗少云、高温低湿、大气层结稳定的气象条件下, 太原和石家庄的地表污染物排放产生的氮氧化合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, 对北京的地表污染造成影响。

通过对实际观测数据的分析并结合纯化学机理模式模拟, 马建中等发现瓦里关夜间臭氧主要来自自由对流层的输入, 在瓦里关夏季光化学反应损耗臭氧, 上限可达 $-5 \times 10^{-9}/\text{d}$, 冬季臭氧的生成反应略大于消耗反应, 净生成反应上限为 $1 \times 10^{-9}/\text{d}$ 。有关瓦里关臭氧季节变化的原因, 目前尚存在不同的观点。Ma 等^[130]认为, 瓦里关地面臭氧的季节变化主要是由于青藏高原对流活动造成的。

刘煜等^[131]发展了一维对流层化学模式, 研究了北半球中纬度地区臭氧的日变化和季节变化, 以及温度、水汽、太阳辐射和边界层变化对臭氧的影响, 研究了甲烷和一氧化碳对臭氧的影响。并在原有一维对流层化学模式的基础上, 发展了一维对流层-平流层化学模式, 利用该模式研究了 NO_x 排放对臭氧的影响^[132], 结果表明: NO_x 排放的增加主要影响地面和对流层中下层的臭氧, 夏季引起的臭氧增加大于冬季的变化, 同时, 还研究了垂直平流和垂直扩散对臭氧垂直分布的影响, 结果说明: 垂直平流在对流层与平流层的臭氧交换中的作用大于垂直扩散的作用。郭彩丽等^[133]发展了一维辐射-对流模式, 研究了平流层在温室效应中的作用, 研究表明: 平流层使得对流层顶的辐射强迫增加 $7\% \sim 50\%$, 地面温度增加 $20\% \sim 60\%$; 当对流层顶辐射强迫相同时, 平流层使得地面气温增加 $5\% \sim 20\%$; 平流层的温度调整造成对流层对不同成分的温室气体的气候响应存在较大差异, 这些意味着平流层在温室效应中起着重要作用。任传森等^[134]利用一维化学模式研究了全球平均臭氧总量的变化趋势, 其结果表明: 如果哥本哈根修正案得到完全遵守, 臭氧总量将在 2000 年以前开始恢复。

任传森等^[135]发展了二维大气化学模式,研究了南极臭氧洞的形成机制,结果表明:非均相化学反应使得 NO_2 减少,导致臭氧生成率降低,这是臭氧洞形成的主要因素;极涡的强弱不是决定因素,但它影响臭氧洞的强度;太阳周期变化的影响可以忽略。刘煜、李维亮和周秀骥^[136-137]在一维化学模式的基础上,结合二维全球动力模式,发展了全球二维动力-辐射-化学耦合模式。利用该模式研究了动力-辐射-化学耦合反馈作用的影响,模式结果表明:模式可以较好地模拟微量成分的分布和季节变化;臭氧、辐射和温度之间的反馈作用主要影响平流层的中高层;水汽变化对于对流层臭氧有明显的影响,对平流层臭氧的影响较小。付超等^[25]利用二维全球动力、辐射和光化学耦合模式,研究了夏季青藏高原臭氧低谷形成的机理,结果表明:模式较好地再现了青藏高原臭氧总量的季节变化和臭氧低谷的发生;进一步的分析显示青藏高原的动力和热力作用是臭氧低谷形成的主要原因。刘煜等^[138-139]在原有二维全球动力-辐射-化学耦合模式的基础上,增加了 NMHCs,研究了对流层臭氧、一氧化碳和甲烷的收支,结果表明:由平流层向对流层输送的臭氧与对流层净产生的臭氧相当,生成主要发生在北半球中纬度的低层和赤道地区的上层;北半球中高纬是甲烷的源区,而赤道和南半球中高纬是甲烷的汇,在高纬甲烷由平流层向对流层输送,在赤道则相反,全球来看是由对流层向平流层输送;对流层化学过程消耗 CO,主要发生在北半球中高纬和赤道地区的低层。刘洪利等^[140]利用二维化学模式研究了中纬度地区臭氧 QBO 的形成机制。用赤道平流层风的 QBO 作为强迫,模式很好地再现了臭氧的 QBO,并与观测结果非常一致。进一步的分析显示:赤道平流层风 QBO 的不同位相,使得臭氧向中高纬度的动力输送也呈现 QBO 振荡,而在中纬度化学反应消耗也因此呈现出 QBO 振荡。但化学消耗振荡比动力输送振荡滞后 1~2 个月,这个位相差是形成中纬度臭氧 QBO 的直接原因。Liu 等^[141]利用二维全球动力、辐射和光化学模式,研究了青藏高原臭氧的变化趋势,模式结果表明:青藏高原特殊的大气环流不是造成青藏高原臭氧快速减少的原因。

杨健等^[142]利用三维区域化学模式(RADM)研究了中国地区臭氧的分布、日变化和季节变化,以及未来人类排放增加对臭氧的影响,结果显示: NO_x 增加使得地面臭氧在 1 月份减少,在 7 月份增加。

周秀骥等^[143]利用三维区域化学模式(RADM)研究了长江三角洲地区臭氧的分布和变化,结果表明: NO_x 不管冬季(1 月)还是夏季 7 月,在长江三角洲地区以大城市为中心向周围扩展, NO_x 浓度增加,上海等大城市其值可达 50×10^{-9} 以上,夏季比冬季更为强烈。 SO_2 的变化情况和 NO_x 相似,1995 年与 1981 年的变化最大值也可达 50×10^{-9} 以上,夏季变化大于冬季。在长江三角洲的大部分地区,冬季地面臭氧量 1995 年相比 1981 年是减少的,但减少的量不大,而且臭氧大值区出现在郊区而不在大城市,其值最大也仅为 $30 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$ 。在夏季,长江三角洲地区的东北部为臭氧的减少区,减少量最大值为 10×10^{-9} ,在该地区的西南部为臭氧的增加区,增加最大量也可达 10×10^{-9} 左右。

刘煜等^[144]利用三维全球化学模式(Oslo-CTM2)研究了青藏高原臭氧低谷的形成机理,分析显示:在低谷的形成过程中,输送过程起着主要作用,化学过程部分地补偿了输送过程的影响;在 5 月,水平输送起主要作用,在 6—7 月,垂直输送起主要作用;对流和化学过程的作用也不能忽略。刘煜等^[145]利用三维全球化学模式研究了飞机排放的 NO_x 对中国地区臭氧的影响,结果表明:飞机排放的 NO_x 对中国地区 250 hPa 的影响非常显著,1 月 NO_x 增加 50×10^{-12} ,相当于增加了 60%;4 月臭氧增加了 8×10^{-9} ,相当于增加 5%。 NO_x 的增加主要由输送过程造成的,臭氧的增加主要是化学过程产生的。中国地区飞机的 NO_x 的影响相对较小。刘煜等^[146]研究了印度人为排放增加的影响,结果显示:当印度的 NO_x 和 CO 排放增加时,臭氧浓度增加,全球平均的 OH 略有降低。夏季在季风的影响下, NO_x 和 CO 可以被输送到对流层中、上层,使得 NO_x 、CO 和臭氧浓度增加,并广泛影响亚洲、非洲和欧洲的部分地区。这个影响从 6 月持续到 9 月。刘煜等^[147]分析了中国地区 NO_x 的排放资料,分析表明:中国地区 NO_x 的排放快速增长。利用三维全球化学模式研究了中国地区 NO_x 排放增加的影响,模式结果显示:随着 NO_x 排放的增加,中国东部地区 NO_x 浓度不断增加,冬季加速增长;当 NO_x 排放增加到 1995 年的两倍时,冬季中国北方地区 NO_2/NO_x 的比率迅速下降,臭氧浓度降低;夏季南方地区臭氧增加,北方地区臭氧的峰值浓度增加,平均浓度变化不大。夏季在 500 hPa 以下,臭氧浓度增加,

臭氧总量的增加与 NO_x 排放成比例。地面 NO_x 与臭氧的关系将发生变化。

5.3 气溶胶气粒平衡与转化

马建中等^[148]利用气溶胶热平衡模式研究了瓦里关硝酸盐的气-粒平衡状态和气-粒转化过程,结果显示,冬季瓦里关硝酸盐主要(90%)是以颗粒物形态存在,细粒子中的硝酸盐气溶胶不低于粗粒子中硝酸盐气溶胶的含量,这一结果与海洋上空的观测分析结果不同,在瓦里关,硝酸盐细粒子主要是通过气态硝酸与氨气反应生成,硝酸盐粗粒子主要是通过硝酸蒸汽在矿物气溶胶表面凝结形成。

刘煜等^[149]利用多尺度空气质量模式(CMAQ)研究了华北地区二次气溶胶的形成和氨气排放的影响,通过模式结果与观测的 NO_x , CO , O_3 , NH_3 , HNO_3 , SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的对比,说明 CMAQ 空气质量模式能够较好地模拟华北地区污染物的变化。同时,模式结果表明,河北、河南和山东地区 NH_3 的浓度较高,平均浓度为 $30 \times 10^{-9} \sim 35 \times 10^{-9}$ 。模拟试验的结果表明,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大约 30% 以上,特别是在邯郸、安阳地区其作用更显著,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。北京地区边界层高度在白天较高,中午平均为 1500 m。这使得 SO_2 , NH_3 和 HNO_3 可以输送到边界层上部 850 hPa。硫酸盐、铵盐和硝酸盐分别在边界层上、中和下部形成各自高浓度区。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 的寿命较长,因此它们可以被输送到对流层的中层,形成深厚的气溶胶层。因此,北京地区存在气溶胶的穹隆。模式结果建议当要控制华北地区夏季大气中气溶胶的浓度时,除了减少 SO_2 和 NO_x 的排放和一次气溶胶排放外,降低大气中 NH_3 的排放也是有效办法之一。

5.4 周边污染源影响评估

颜鹏、黄健和 Draxler R 等采用分行业、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,用 Hysplit-4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)污染扩散模式,计算了北京 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,模式能够较好的模拟出北京地面 SO_2 的逐日变化特点和季节分布。计算的各种排放源对北京的影响说明总体上,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%,个别时候甚至超过 40%;如果考虑周边源的采暖期源强增大一倍,则采暖期周边源平均贡献 2000 年和 2001 年分别增加到 35% 和 40%。对北京市划分的 7 类排放源分别计算其对北京地面 SO_2 的浓度贡献率发现在北京市区的各类排放源中,占北京市区排放量较少部分(不到三分之一)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^[150-151]。

5.5 空气质量预报模式

5.5.1 CAPPS

徐大海和朱蓉等自主开发建立了城市大气污染数值预报系统(CAPPS),该系统主要特点在于不依赖城市污染源排放清单,而是通过在监测浓度反算出排放源强的基础上,根据气象背景预报,计算出下一时刻的污染物浓度分布,解决了当前我国因缺乏详细源清单的情况下,开展城市空气污染预报服务中的一个关键技术难题。此外,用有限体积分法求解大气平流扩散方程,避免了有限差分求解时存在的质量不守恒问题。在全国区域数值天气预报的基础上,CAPPS 预报系统可以同时预报 47 个重点城市的污染浓度值,特别适合气象部门从国家气象中心的中央气象台到地方气象台组成的城市空气质量预报网的业务需要^[152-153]。

5.5.2 CMAQ-MOS 和源同化方案

许建明、徐祥德、刘煜等鉴于美国 EPA 新一代空气质量模式 CMAQ 对多类污染物不同尺度“面空间”分布及其变化倾向虽具有较强的预报能力,但由于污染源时空特征十分复杂,模式采用的平均源排放清单难以精细、客观描述预报区域不同尺度污染源强度的时空变化。为了修正上述模式产品源排放清单产生的系统性预报偏差,提出利用不同季节 CMAQ 模式产品与观测实况资料,建立 CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正预报模型,并采用检验方法评估 CMAQ-MOS 方案预报能力,提出采用 CMAQ-MOS 统计-动力相结合的空气质量预报新途径。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,明显提高了 CMAQ 模式空气质量预报水平。亦提出了采用点-面结合预报思路,即在大气污染具有同位相变化特征的“影响域”范围内,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,以及区域平均空气

质量“面预报”方案^[154-155]。

徐祥德、周秀骥等针对当前国内外关于排放源反演模型的关键科学技术难题,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。根据研究分析,该源同化修正模型明显提高了空气质量模式的预报水平,并通过 2004 年排放源资料的检验,证实该模式源同化修正新技术具有客观性与科学价值。

5.6 稻田温室气体(CH_4 和 N_2O)排放

刘建栋等^[156]在美国 DNDC 模式的基础上,综合气象学、农业气象学和生态最新研究进展,将作物生长、碳氮循环及 CH_4 排放耦合,建立 CH_4 排放数值模式,模式通过相关显著性检验,结果表明: CH_4 与生长期平均气温成正相关, CH_4 排放有 4~5 年周期,与温度年际变化规律一致。 CH_4 排放年际变化与生长季平均温度变化趋势一致。刘建栋等^[157-158]将生物地球化学 C、N 循环模式与植物生态模式耦合,建立了生物地球化学-植被生态耦合动力模式。验证表明模型可以准确模拟稻田生态系统中作物生长及 CH_4 、 N_2O 排放过程。利用模式分析了不同施肥量对 CO_2 吸收及 CH_4 、 N_2O 排放的影响,以及 3 种温室气体综合增温潜势的演变规律,发现了生长期稻田综合增温潜势源汇交替现象,提出最大汇施肥量以及零排放施肥量等概念。利用模式研制了长江三角洲地区不同施肥方案,为该地区可持续发展提供了科学依据。

5.7 源清单及其评估

在国家自然科学基金项目“中国地区上空飞机的 NO_x 排放对大气臭氧影响的数值模拟”的研究工作中,马建中等^[159]搜集了大量中国民航航班统计资料,发展了 1997—1998 年中国地区上空飞机污染物的四维(1° (经度) $\times 1^\circ$ (纬度) $\times 1$ km(高度) $\times 1$ h)排放清单,发现目前中国地区上空飞机的污染物排放仅为全球飞机总排放量的 2%。马建中和 Van Aardenne^[160]分析了排放源清单的不确定性对模拟的中国地区夏季对流层臭氧的影响。考虑的 3 个独立的排放源清单为:① 1995 年的全球大气研究排放数据库(EDGAR)的排放估计,② 太平洋地区输送和化学演变研究计划(TRACE-P)使用的根据 2000 年的排放做出的区域排放源清单,③ 中国臭氧研究计划(CORP)使用的根据 1995 年的排放估计做出的全

国排放源清单。马建中等^[161]通过模式模拟与 GOME 卫星资料的对比分析发现,David Streets 等过低估计了 2000 年中国地区 NO_x 排放量。

6 空气质量预报技术和环境评价

气科院早期(1980—1982 年)李郁竹、杨东贞等曾开展了空气潜势预报工作。联合北京市气象科学研究所、北京市卫生防疫站和北京气象专科学校进行了北京市空气污染气象预报研究和业务试预报,对开展城市空气污染预报提供了可以借鉴的途径和方法^[162]。进入 20 世纪 90 年代末气科院在 CAPPS 系统基础上建立了多城市污染指数数值预报业务系统,并在近期建立了 CMAQ-MOS 源同化版业务系统。

6.1 CAPPS

中国气象局预测减灾司分别于 2000 年和 2002 年组织将徐大海和朱蓉研制的 CAPPS 第一版和第二版推广到了全国 47 个城市的气象业务部门和国家气象中心,为开展全国 47 个城市空气质量预报业务提供了技术手段^[152-153]。2003—2004 年课题组分别将澳大利亚光化学方案 IER 和 GRS 引入 CAPPS 中,建立了 CAPPS 城市臭氧业务预报模式系统。2005 年中国气象局立项支持 CAPPS 模式系统第三版的开发,为区域气象中心和省级气象业务部门开展区域空气质量预报提供技术方法和业务平台。CAPPS 第三版于 2005 年 10 月在上海市气象局开始进行华东区空气质量业务预报试验,2006 年 5 月开始在中国气象局大气成分中心开始进行全国范围的空气质量业务预报试验^[163-165]。

6.2 CMAQ-MOS 源同化版业务系统

徐祥德等在国家气象中心 IBM 巨型机上实现对华北 5 省业务预报工作基础上,正在将 CMAQ 模式源同化改进版,继续实现全国范围的业务预报试验,目前预报产品已发向全国 30 个省(市、自治区)。2006 年以来分别于 5 月和 8 月召开了两次全国业务推广会议,全国绝大多数省(市、自治区)派员参加了业务推广会议,学习到了最新空气质量预报动力-统计方案,推动了当地空气质量预报工作。其中 8 个省明显地提高了空气质量预报的准确率。下一步计划在以上工作基础上,对源同化进一步细化,分清不同时期不同时间源排放清单,并将全国预报区的技术成果发展到北京城市不同尺度区域细网格空气

质量预报技术以及奥运期间应急调控决策系统。

6.3 大气环境评价

李世奎等在国内首次建立了利用六氟化硫(SF_6)做为示踪剂进行大气扩散实验研究方法,该方法已被广泛地应用于大气环境评价^[166]。杨东贞等与中国医学科学院协作对江苏、湖南、福建和广东等省的中小型化工厂和化肥厂排放的有害气体所造成的危害及其扩散和稀释的规律进行综合调研为国家制定卫生标准提供依据^[167-169]。总之,多年来气科院完成了几十项大气环境评价项目。1979年,沮铁林和徐大海负责制订地方大气污染排放标准的技术原则和方法,首次区划了我国的风方位、污染系数和大气稳定度,提出了城市总量控制的方法和点源排放 p 值法,并于1984年4月正式公布实施^[162]。

1985年沮铁林等在北京西四和前三门大街做了街谷大气扩散试验研究,得出了街谷背风涡等一系列有价值的规律^[170]。为实现城市面源的数值模拟,对 Monte-Carlo 模式的浓度计量和水平扩散等方面做了改进,大大提高了模拟准确率^[171]。

7 中国背景大气成分观测

中国气象局大气成分监测站网,特别是其中的大气本底监测站网的建设,不仅仅是大气化学业务系统的建设,其本身也强烈地需求大气化学科研的支撑。20多年来中国气象局大气成分监测站网的建设不仅包涵了无数从事大气化学科研人员大量的科研积累,同时也为大气化学研究及其他大气科学的研究提供了更广阔的科研平台。

7.1 大气本底观测站网

7.1.1 瓦里关本底台

从1989年开始,历时数年根据世界气象组织(WMO)全球大气观测系统的选址及观测指南的要求,经过多批次人员站点调研及系统的野外观测论证基础上,1994年9月17日,中国大气本底基准观象台(简称瓦里关本底台)宣告成立,揭开了我国全球大气本底业务观测的序幕。该项目是由中国气象局和世界气象组织(WMO)合作组建,周秀骥院士为首席科学家。瓦里关本底台的选址及建设是国际合作的范例,得到了WMO和GEF等国际组织以及加拿大、美国、澳大利亚等国对口合作伙伴在资金、人员和技术方面的援助。过去10年的运行中,除了中国气象局稳定的业务经费投入外,瓦里关本底台

还得到其他有关国际组织、国内外相关机构和部门的各种支持,并和加拿大、美国、澳大利亚、瑞士、芬兰、德国、日本、韩国等建立了长期双边关系,还与国内、外科研机构和院校开展了多项合作。瓦里关本底台是WMO/GAW的22个全球基准站之一,也是目前欧亚大陆腹地唯一的大陆型全球基准站。遵循WMO/GAW技术规范体系,陆续开展了包括温室气体及相关微量成分、降水化学、气溶胶化学及光学特性、反应性气体、臭氧总量、太阳辐射、气象等多种类型要素的长期观测,为研究气候、环境变迁提供了可靠的基础资料和基准参照值,也为我国的可持续发展和环境外交提供宝贵的科学依据。瓦里关本底台同时也是中国气象局大气本底观测网的核心台站,2001年入选中华人民共和国科学技术部的“国家重点野外科学观测试验站(试点站)”。过去10年中,还协助完成了包括国家自然科学基金重大项目及面上项目、国家科委攻关项目、国家科技部基础性工作和公益性研究项目等在内的一大批科研任务,充分发挥了作为特殊野外观测研究台站的科学价值和应用价值^[172]。

7.1.2 区域本底站

中国是较早开展大气本底观测的国家之一。早在1981年,中国气象局就在北京密云上甸子建立了我国第一个区域大气本底污染监测站,并于1983年和1991年分别在浙江临安和黑龙江龙凤山建成了另外两个区域大气本底污染监测站^[175]。从2004年开始完成了云南香格里拉、新疆阿克达拉选址和科学试验、建设可行性研究报告的专家评审和修改,上述2个站点2006年分期投入建设,完成了湖北金沙本底站预选站址现场考察,近期正在该点进行为期一年的科学论证实验;区域本底站观测项目已由最初三个项目扩展到包括温室气体、气溶胶、臭氧及反应性气体、降水化学、太阳辐射等内容^[173]。

7.2 酸雨站网

2006年在现有88个酸雨站基础上增建了69个酸雨站点,进一步提高了我国酸雨站网分布密度,使其空间布局更加合理^[173]。目前其主要承担我国大气湿沉降pH值和电导率的测定,以了解我国大气酸沉降的分布特征及变化趋势。

7.3 沙尘暴站网

从2003年起已在全国建立了28个沙尘暴站,为开展沙尘暴预报积累了大量科学数据^[173]。

7.4 大气成分观测站

在原有沙尘暴站网基础上推进 30 个全国大气成分观测站建设,逐项开展大气成分的全国联网观测。经过 1~3 年分期建设,逐步构建地理覆盖面相对完整、区域代表性较为典型、观测及质量保证体系标准化和规范化的全国大气成分观测站网^[173]。

7.5 臭氧总量观测网

中国气象局现已有包括瓦里关、上甸子、临安和南极中山站等 4 个站点在内的臭氧总量观测网,至今已积累了十几年的臭氧总量资料,为我国臭氧总量研究奠定了科学基础。有关臭氧探空业务观测项目工程设计/实施方案已通过专家论证^[173]。

汤洁主持了科技部国家社会公益研究专项“大陆大气本底基准研究”,其主要研究内容包括:我国不同地区的主要温室气体——二氧化碳、甲烷、氧化亚氮的大气本底值及其变化规律;我国不同地区地面臭氧、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳的大气本底值及其变化规律,并分析可能存在的长期变化趋势以及与区域大气环境之间的关系;我国不同地区大气气溶胶浓度、化学组成成分的大气本底值及其变化规律,并分析可能存在的长期变化趋势以及与区域大气环境之间的关系;我国不同地区的 UV-B 辐射的大气本底值、变化规律及其与大气臭氧总量和总辐射间的相互依存规律。

由于时间仓促,气科院近 30 年来大气化学和大气环境浩瀚的积累,收集成果难免有遗漏和不准确之处,望读者不吝赐教。

致 谢 本文完成过程中承蒙温玉璞、杨东贞、王木林、汤洁、徐晓斌、于晓岚、张晓春、周凌晔、朱蓉同志的大力协助,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 符基萌,曾宪英,温玉璞,等. 西太平洋气溶胶微量元素初步研究. *气象学报*, 1991, 49(1):54-63.
- [2] 符基萌,苏维瀚. 西太平洋降水化学的研究. *海洋学报*, 1991, 13(2):192-199.
- [3] Farn Parungo, Clarence Nagamoto, Li Xingsheng, et al. Investigation of Atmospheric Aerosol and Gases at an East China Station. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-201, 1993.
- [4] Zhou Xiuji, Luo Chao, Ding Guoan, et al. Preliminary analysis of the variations of surface ozone and nitric oxides in Lin'an. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 7(3):288-293.
- [5] 周秀骥,罗超,丁国安,等. 中国东部地区大气臭氧及前体物本底变化规律的初步研究. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(12):1323-1330.
- [6] Liu Qijun, Zhou Xiuji, Luo Chao, et al. Measurements of reactive nitrogen species in the eastern China during the experiment PEM-WEST. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9(2):162-168.
- [7] 罗超,丁国安,李兴生,等. 中美大气化学联合考察实验结果的初步分析与比较. *气象学报*, 1998, 56(4):467-475.
- [8] 周秀骥,罗超,李维亮,等. 中国地区臭氧总量与青藏高原低值中心. *科学通报*, 1995, 40(15):1396-1398.
- [9] 周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一). 北京:气象出版社,1996.
- [10] 周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京:气象出版社,1997.
- [11] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京:气象出版社,2004.
- [12] 徐祥德,卞林根,丁国安,等. 城市大气环境观测工程技术与原理. 北京:气象出版社,2003.
- [13] Xue Qingyu, Niu Jianguo, Zhao Xuepeng, et al. Remote sensing of Atmospheric constituents and the multifunction spectrophotometer. *Acta Meteorologica Sinica*, 1991, 5(3):352-359.
- [14] 郑向东,周秀骥,陆龙骅,等. 1993 年中山站南极“臭氧洞”的观测研究. *科学通报*, 1994, 40(6):533-535.
- [15] Zhou Xiuji, Zheng Xiangdong, Lu Longhua, et al. Based measurements of column abundance of ozone and UV-B radiation over Zhongshan station, Antarctica in 1993 “Ozone Hole”. *Antarctic Research*, 1995, 6(1):1-11.
- [16] 陆龙骅,周秀骥,卞林根,等. 1993 年南极臭氧洞期间普里兹湾地区的大气振荡. *科学通报*, 1996, 41(7):636-639.
- [17] Eskes H J, Vader A R J, Brinsma E J, et al. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of Sciamachy on Envisat. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2005, 5:4429-4475.
- [18] 郭松,周秀骥,张晓春. 青海高原地区臭氧和 UVB 观测结果的初步分析. *科学通报*, 1994, 39(1):50-53.
- [19] Liu Qijun, Zheng Xiangdong, Luo Chao, et al. Intercomparison of ozone vertical profiles between ECC ozonesonde and Brewer Umkehr made over Qinghai plateau of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 16(1):103-111.
- [20] Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. Atmospheric total ozone variation in China and anomalous low-value center of ozone over the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(15):1396-1398.
- [21] Zou Han. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(9):1029-1032.
- [22] 陈月娟,施春华. 从 HALOE 资料看青藏高原上空 HCl 的分布及其与 O₃ 的关系. *高原气象*, 2005, 24(1):1-8.
- [23] 郑向东,汤洁,周秀骥,等. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究. *应用气象学报*, 2000, 11(2):173-179.
- [24] Yoon S Kim, Takashi A, Iwasaka Y, et al. Enhancements of Aerosols near the Cold Tropopause in Summer over Tibetan Plateau: Lidar and Balloon Born Measurements in 1999 at Lhasa, Tibet, China. *PROC SPIE*, 2003.
- [25] 付超,李维亮,周秀骥. 夏季青藏高原上空臭氧总量低值区形

- 成的模拟试验//周秀骥. 中国地区大气臭氧总量的变化及其对气候环境的影响(二). 北京:气象出版社,1997:274-285.
- [26] Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji. Prediction of the trend of total column ozone over the Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(Suppl 1): 385-389.
- [27] 刘煜, 李维亮. 青藏高原臭氧低谷的加深及其可能的影响. 气象学报, 2001, 59(1): 97-106.
- [28] Liu Qijun, Zheng Xiangdong, Luo Chao, et al. Ozone vertical profile characteristics over Qinghai Plateau measured by electrochemical concentration cell ozonesondes. *Adv Atmos Sci*, 1997, 14(4): 481-490.
- [29] 郑向东, 周秀骥, 秦瑜, 等. 夏季西宁地区的对流层臭氧垂直分布. 臭氧探空与气象探空的观测结果分析. 气象学报, 2002, 60(1): 48-52.
- [30] Zheng Xiangdong, Zhou Xiuji, Tang Jie, et al. A meteorological analysis on a low tropospheric ozone event over Xining, North western of China on 26—27 July, 1996. *Atmos Environ*, 2004, 38: 261-271.
- [31] 郑向东, 陈尊裕, 崔宏, 等. 长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征——以 2001 年浙江临安观测为例. 中国科学(D 辑), 2005, 48(9): 1519-1528.
- [32] 郑永光, 陈鲁言, 陈尊裕, 等. 2001 年春季临安、昆明和香港臭氧垂直分布特征的对比分析. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(1): 104-114.
- [33] Chan C Y, Zheng X D, Chan L Y, et al. Vertical profile and origin of wintertime tropospheric ozone over China during the PEACE-A period. *J Geophys Res*, 2004, 109, D23S06, doi: 10.1029/2004JD004581.
- [34] 郑向东, 丁国安, 孙敏锋, 等. 北京冬季低层大气 O_3 垂直分布观测结果的研究. 应用气象学报, 2002, 13(增刊): 100-108.
- [35] 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 1): 45-52.
- [36] 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.
- [37] 丁国安, 罗超, 汤洁, 等. 清洁地区气象因子与地面 O_3 关系的初步研究. 应用气象学报, 1995, 6(3): 350-355.
- [38] 汤洁, 李兴生, 赵玉成, 等. 青海瓦里关地面臭氧的观测和初步结果//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响. 北京:气象出版社, 1995: 19-29.
- [39] 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 我国地面 O_3 , NO_x , SO_2 背景值的观测研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 53-61.
- [40] 罗超, 丁国安, 李兴生, 等. 中美大气化学联合考察实验结果的初步分析与比较. 气象学报, 1998, 56(4): 467-475.
- [41] 徐晓斌, 丁国安, 李兴生, 等. 龙凤山大气近地层 O_3 浓度变化及与其它因素的关系. 气象学报, 1998, 56(5): 560-572.
- [42] Ding Guoan, Xu Xiaobin, Xiang Rongbiao, et al. Reasurech on surface ozone with meteorological conditions under atmospheric background conditions in northeast China. *Acta Meteoroloica Sinica*, 1997, 11(4): 478-488.
- [43] 丁国安, 徐晓斌, 罗超, 等. 中国大气本底条件下不同地区地面臭氧特征. 气象学报, 2001, 59(1): 88-96.
- [44] Ding Guoan, Xu Xiaobin, Luo Chao, et al. Surface ozone characteristics at three stations in GAW of WMO in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15(1): 21-28.
- [45] 丁国安, 汤洁, 房秀梅, 等. 我国南方清洁地区春季地面 O_3 的某些特点. 科学通报, 1991, 8: 603-605.
- [46] Ding Guoan, Tang Jie, Fang Xiumei, et al. Some characteristics of surface O_3 in spring in clean area of south China. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(13): 1097-1100.
- [47] 刘玉彻, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京秋季城区和近郊近地层 O_3 特征. 气象科技, 2005, 33(6): 520-525.
- [48] 徐晓斌, 林伟立, 王韬, 等. 长江三角洲对流层臭氧的变化趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(5): 211-216.
- [49] 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰, 等. 南、北极考察航线表面臭氧的观测. 科学通报, 2001, 46(15): 131-136.
- [50] 郑向东, 万国江, 汤洁, 等. 瓦里关山近地面大气悬浮颗粒物中铍-7 和铅-210 的观测结果及其对臭氧浓度变化的示踪. 科学通报, 2005, 50(1): 72-76.
- [51] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 北京市区大气污染的时空特征. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 92-99.
- [52] 汤洁, 张晓山, 郑向东, 等. 青海瓦里关山地区大气过氧化氢的观测与分析. 自然科学进展, 2002, 12(2): 161-165.
- [53] 王木林, 程红兵, 孟昭阳, 等. 二维毛细管柱气相色谱法测定大气中的挥发性烃类. 色谱, 2002, 20(2): 172-177.
- [54] 王木林, 程红兵, 丁国安. 北京地区大气中 VHCs 观测结果的初步分析. 应用气象学报, 2005, 16(5): 600-607.
- [55] 徐晓斌, 向荣彪, 丁国安, 等. 中国大陆本底大气 NMHC 的浓度和构成及其与臭氧的关系//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一). 1996. 北京:气象出版社: 67-81.
- [56] 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.
- [57] 于晓岚, 汤洁, 李兴生, 等. 我国西部清洁大气中 SO_2 和 NO_2 的观测和分析. 应用气象学报, 1997, 8(1): 62-70.
- [58] 孟昭阳, 丁国安, 于海青, 等. 北京北部城区 SO_2 和 NO_2 浓度垂直分布初探. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 109-112.
- [59] 王木林, 温玉璞, 程红兵, 等. 对流层大气中甲烷(CH_4)的观测研究. 科学通报, 1989, 20: 1565-1567.
- [60] Wang Mulin, Wen Yupu, Cheng Hongbing, et al. Study of Observation for CH_4 concentration in Troposphere. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(20): 1709-1713.
- [61] 王木林, 温玉璞, 程红兵. 中国大陆对流层大气中甲烷(CH_4)浓度背景特征的研究. 气象学报, 1993, 51(4): 485-489.
- [62] 王木林, 李兴生, 程红兵, 等. 浙江临安水稻田甲烷排放通量的观测研究. 应用气象学报, 1994, 5(4): 402-408.
- [63] Shao Zhiqing, Li Xingsheng, Zhou Xiuji, et al. Gradiene measurement of methane flux in Lin'an rice paddies. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9(2): 152-161.
- [64] 徐晓斌, Bingemer H G, Georgii H W, 等. 梯度法观测大气与

- 森林生态系统间羧基硫(COS)的交换通量. 气象学报, 1996, 54(3):357-364.
- [65] 丁国安, 刘晶淼, 颜鹏, 等. 利用条件采样法在常熟稻田测定 N_2O 大气垂直通量初步观测结果. 应用气象学报, 2004, 15(4):456-467.
- [66] 杨东贞, 徐晓斌. 一次黄沙天气过程的分析. 气象学报, 1991, 49(3):334-342.
- [67] Yang Dongzhen, Xu Xiaobin, Wen Yupu, et al. A case study on sandstorm. *Acta Meteorologica Sinica*, 1991, 5(2):150-159.
- [68] 杨东贞, 王超, 温玉璞, 等. 对 1990 年春季两次沙尘暴特征的分析. 应用气象学报, 1995, 6(1):18-26.
- [69] 杨东贞, 于晓岚, 颜鹏, 等. “93.5.5 黑风”沙尘气溶胶的分析 // 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1996: 103-110.
- [70] Yang Dongzhen, Wang Chao, Yu Xiaolan. A Characteristic analysis of aerosols from sandstorms. *Annual Report of CAMS*, 1993—1994: 43-52.
- [71] 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 1):195-205.
- [72] Yang Dongzhen, Xu Xiangde, Liu Xiaoduan, et al. Complex sources of air-water pollution processes in the Miyun reservoir region. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Suppl II):230-245.
- [73] 杨东贞, 王超, 颜鹏, 等. 春季沙尘暴的发生源地及输送沉降的探讨 // 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1996: 111-117.
- [74] 杨东贞, 房秀梅, 李兴生. 我国北方沙尘暴变化趋势的分析. 应用气象学报, 1998, 9(3):352-357.
- [75] 周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(D 辑), 2002, 32(4):327-334.
- [76] 徐晓斌, 杨东贞, 温玉璞, 等. 北京地区夏季背景气溶胶的特征. 气象学报, 1992, 50(3):308-319.
- [77] 杨东贞, 于晓岚, 房秀梅, 等. 区域站和基准站气溶胶的分析. 应用气象学报, 1996, 7(4):396-405.
- [78] 杨东贞, 颜鹏, 张养梅, 等. WMO 区域本底站气溶胶特征分析. 第四纪研究, 2006, 26(5):733-741.
- [79] 温玉璞, 徐晓斌, 汤洁, 等. 青海瓦里关大气气溶胶元素富集特征. 应用气象学报, 2001, 12(4):400-407.
- [80] 温玉璞, 周明煜, 杨绍晋, 等. 我国陆地和西太平洋上空气溶胶性质的对比及其长距离输送. 气象学报, 1991, 5(2):160-170.
- [81] 汤洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究. 应用气象学报, 1999, 10(2):160-170.
- [82] 汤洁, 秦世广, 温玉璞, 等. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义. 气象, 2001, 27(11):3-7.
- [83] 游来光, 杨绍忠. 1995 和 1996 年春季北京地区大气冰核浓度的观测与研究. 气象学报, 2002, 60(1):101-109.
- [84] 颜鹏, 毛节泰, 杨东贞, 等. 临安一次沙尘暴过程影响气溶胶物理化学特性演变的初步分析. 第四纪研究, 2004, 24(4):437-447.
- [85] 颜鹏, 张养梅, 杨东贞, 等. 临安 2003 年夏季地区大气气溶胶离子成分的尺度分布特征. 气象学报, 2005, 63(6):980-987.
- [86] 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.
- [87] 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 1):31-44.
- [88] Ding Guoan, Chen C Y, 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.
- [89] 徐祥德, 施晓晖, 谢立安, 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.
- [90] 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.
- [91] 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 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.
- [92] Xu Xiangde, Zhou Xiuj, Shi Xiaohui. Spatial structure and scale feature of the atmospheric pollution source impact of city agglomeration. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Suppl II):1-24.
- [93] 徐祥德, 周秀骥, 翁永辉, 等. 星载 MODIS 资料与地面光度探测气溶胶变分场. 科学通报, 2003, 48(15):16801-1685.
- [94] 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析. 大气科学, 2002, 26(6):721-730.
- [95] 罗云峰, 周秀骥, 李维亮, 等. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状. 地球科学进展, 1998, 13(6):572-581.
- [96] 施晓晖, 徐祥德, 张胜军, 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 1):206-218.
- [97] Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Zhang Shengjun, et al. Analysis to significant climate change in aerosol influence domain of Beijing and its peripheral area by EOF mode. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Suppl II):246-261.
- [98] Farn Parrungo, Li Xingsheng, Yang Dongzeng, et al. STC Technical Report 2906, 2959, 3111, 3134. Asian Duststorms and Their Effects on Radiation and Climate. Science and Technology Corporation. 101 Research Drive, Hampton, Virginia 23666-1340. 1995—1997.
- [99] 李洪珍, 王木林. 我国降水酸度的初步研究. 气象学报, 1984, 42(3):332-339.
- [100] 王木林, 李洪珍. 华北四地降水酸度的观测与分析. 气象, 1984, 2:21-22.
- [101] 王木林, 李洪珍. 杭州、南宁、南京、合肥等地 1981 年酸雨观测结果及其初步分析. 环境科学, 1984, 5(4):52-53.
- [102] 丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. 气象学报, 1991, 49(2):190-197.
- [103] 丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 等. 庐山降水化学垂直分布的初步

- 研究. 应用气象学报, 1990, 1(4): 360-368.
- [104] 刘奇俊, 丁国安, 汤洁, 等. 云、雨水酸度和离子浓度与其微物理参数的关系. 气象学报, 1993, 51(2): 195-202.
- [105] 丁国安, 徐晓斌, 房秀梅, 等. 中国酸雨现状及发展趋势. 科学通报, 1997, 42(2): 170-173.
- [106] Ding Guoan, Xu Xiaobin, Fang Xiumei, et al. Current status and future of acid rain in China. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(24): 2076-2080.
- [107] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 全国湿沉降酸性气体时空分布特点研究.“八五”国家科技攻关项目(编号 89-912-01-01-07)研究报告. 1995.
- [108] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析. 应用气象学报, 2004, 15(增刊): 85-94.
- [109] 杨东贞, 周怀刚, 张忠华. 中国区域空气污染本底站的降水化学特征. 应用气象学报, 2002, 13(4): 430-439.
- [110] 赵艳霞, 侯青, 徐晓斌, 等. 2005 年中国酸雨时空分布特征. 气候变化研究进展, 2006, 2(5): 24-245.
- [111] 汤洁, 薛虎圣, 于晓岚, 等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析. 环境科学学报, 2000, 20(4): 420-425.
- [112] 于晓岚, 汤洁, 师昱峰, 等. 中国南极长城站 1998 年大气降水化学特征的初步研究. 气象学报, 2002, 60(4): 494-501.
- [113] Tang Jie, Yu Xiaolan, Shi Yufeng, et al. The preliminary study on the precipitation chemistry at the Chinese Great Wall station, Antarctica in 1998. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(3): 364-375.
- [114] 郑敏, 李兴生. 海洋大气边界层中二甲硫醚(DMS)的数值模拟//中国气象局科教司“八五”重点课题总结: 我国大陆和西太平洋地区大气痕量气体及其它化学物质的监测和研究. 1996: 302-311.
- [115] 李兴生, 韩子光, 颜鹏. 西太平洋地区 DMS 及其它硫化物的观测研究//中国气象局科教司“八五”重点课题总结: 我国大陆和西太平洋地区大气痕量气体及其它化学物质的监测和研究. 1996: 322-332.
- [116] 李兴生, 郑敏, 颜鹏. 西太平洋区域二甲硫酸醚及其它硫化物的模拟研究//中国气象局科教司“八五”重点课题总结: 我国大陆和西太平洋地区大气痕量气体及其它化学物质的监测和研究. 1996: 312-321.
- [117] 李兴生. 我国对流层大气中硫化物化学过程的三维数值模拟//中国气象局科教司“八五”重点课题总结: 我国大陆和西太平洋地区大气痕量气体及其它化学物质的监测和研究. 1996: 135-159.
- [118] 刘奇俊, 胡志晋, 丁国安, 等. 层状云清除气溶胶的数值模拟研究. 环境科学学报, 1992, 3(3): 288-296.
- [119] 刘奇俊, 胡志晋, 丁国安, 等. 层状云酸化数值模拟研究. 应用气象学报, 1992, 3(增刊): 52-58.
- [120] Luo Chao, Zhou Xiuji. A regional model study of the variations and distributions of ozone and its precursors on eastern Asia and west Pacific Ocean regions. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 8(2): 195-202.
- [121] 杨昕, 李兴生. 近地面 O_3 变化化学反应机理的数值研究. 大气科学, 1999, 23(4): 427-428.
- [122] 王喜红, 李兴生. 中国地区对流层臭氧变化和输送的数值模拟研究——区域气象模拟(1)//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京: 气象出版社, 1997: 225-234.
- [123] 王喜红, 李兴生. 中国地区对流层臭氧变化和输送的数值模拟研究——区域化学模拟(2)//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京: 气象出版社, 1997: 235-243.
- [124] Ma J, Li W L, Zhou X J. Improvement of the RADMI gas-phase chemical mechanism. *Journal of Environmental Science and Health*, 2000, A35(10): 1931-1939.
- [125] Ma J, Liu H L, Hauglustaine D. Summertime tropospheric ozone over China simulated with a regional chemical transport model, I. Model description and evaluation. *J Geophys Res*, 2002, 107(D22): 4660. (doi:10.1029/2001JD001354)
- [126] Ma J, Zhou X J. Development of a three-dimensional inventory of aircraft NO_x emissions over China. *Atmos Environ*, 2000, 34(3): 389-396.
- [127] Ma J, Zhou X J, Hauglustaine D. Summertime tropospheric ozone over China simulated with a regional chemical transport model, II. Source contributions and budget. *J Geophys Res*, 2002, 107(D22): 4612. (doi:10.1029/2001JD001355)
- [128] Ma J, Tang J, Zhou X J, et al. Estimates of the chemical budget for ozone at Waliguan Observatory. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2002, 41(1): 21-48.
- [129] 江文华, 马建中. 区域化学模式中 NO_x 和 O_3 源示踪法的引入. 气象学报, 2006, 64(3): 281-292.
- [130] Ma J, Zheng X D, Xu X D. Comment on “Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan?” by Bin Zhu et al. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(1): L01804. (doi:10.1029/2004GL020868)
- [131] 刘煜, 周秀骥, 李维亮. 对流层臭氧的数值模拟研究. 应用气象学报, 1990, 1(1): 45-56.
- [132] 刘煜, 周秀骥, 李维亮. 大气臭氧垂直分布变化的模拟研究. 应用气象学报, 1993, 4(1): 45-51.
- [133] Guo Caili, Li Weiliang, Liu Yu. The role played by the stratosphere in greenhouse effect. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 7: 50-60.
- [134] 任传森, 周秀骥, 李维亮, 等. 全球平均臭氧总量预测研究//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京: 气象出版社, 1997.
- [135] Ren Chuansan, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Numerical simulation of the formation mechanism of the Antarctic ozone hole. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11: 257-270.
- [136] Liu Yu, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Development of the 2-D coupled stratospheric-tropospheric dynamic-radiative-chemical model—Part I: The description of model and its preliminary results. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11: 271-286.
- [137] Liu Yu, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Development of the 2-D coupled stratospheric-tropospheric dynamic-radiative-chemical model—Part II: Results and discussion of sensitivity experiments.

- Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 12: 345-360.
- [138] 刘煜, 李维亮, 周秀骥. 二维全球平流层-对流层动力-辐射和光化学耦合模式的研究. 对流层臭氧的收支 // 周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(二). 北京: 气象出版社, 1997.
- [139] Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji. Development of the 2-D coupled stratospheric-tropospheric dynamic-radiative-chemical model—Part III: Budget of tropospheric ozone. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 13: 200-211.
- [140] Liu Hongli, Li Weliang, Zhou Xiuji. Numerical investigation of QBO in ozone. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 13: 385-402.
- [141] Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji. Prediction of the trend of total column ozone over the Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(Supp): 385-389.
- [142] Yang Jian, Li Weliang, Zhou Xiuji. Numerical simulation of the seasonal variation of tropospheric ozone and future scenario forecast in China, East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate // Chang C P, Wu Guoxiong, Jou Ben, et al. World Scientific, 2000.
- [143] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用. 北京: 气象出版社, 2004: 1-370.
- [144] Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji. Mechanism of formation of ozone valley over Tibetan Plateau in summer-transport and chemical process of ozone. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 103-109.
- [145] Liu Yu, Isaksen I S A, Sundet J, et al. Impact of aircraft NO_x emission on NO_x and ozone over China. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 565-574.
- [146] Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji, et al. The possible influences of the increasing anthropogenic emissions in India on the tropospheric ozone and OH. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 968-977.
- [147] Liu Yu, Isaksen I S A, Sundet J, et al. NO_x change over China and its influences. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 132-140.
- [148] Ma J, Tang J, Li S M, et al. Size distributions of ionic aerosols measured at Waliguan Observatory: Implication for nitrate gas-to-particle transfer processes in the free troposphere. *J Geophys Res*, 2003, 108(D17): 4541. (doi:10.1029/2002JD003356)
- [149] Liu Yu, Li Weliang, Zhou Xiuji. Simulation of secondary aerosols over North China in summer. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Supp II): 185-195.
- [150] 颜鹏, 黄健, Draxler R. 北京地区 SO₂ 污染的长期模拟及不同类型排放源影响的计算与评估. 中国科学(D 辑), 2005, 35(增刊 I): 167-176.
- [151] Yan Peng, Huang Jian, Roland Draxler. The long-term simulation of SO₂ and evaluation of contributions from the different emission sources to Beijing city. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(Supp II): 196-208.
- [152] 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.
- [153] 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.
- [154] 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.
- [155] Xu Jianming, Xu Xiangde, Liu Yu, et al. Air pollution concentration and control strategies of energy-use related sources in Beijing. *Science in China (Series D)* 2005, 48(Supp II): 155-172.
- [156] 刘建栋, 周秀骥, 于强. 长江三角洲稻田生态系统综合增温潜势源汇交替的树枝分析. 中国科学(D 辑), 2003, 33: 105-113.
- [157] 刘建栋, 周秀骥, 王建林, 等. 稻田 CH₄ 排放的农业气象数值模拟研究. 气象学报, 2001, 12: 409-417.
- [158] 刘建栋, 周秀骥, 于强. 长江三角洲稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的数值模拟. 自然科学进展, 2001, 11(9): 960-965.
- [159] Ma J, Zhou X J. Development of a three-dimensional inventory of aircraft NO_x emissions over China. *Atmos Environ*, 2000, 34(3): 389-396.
- [160] Ma J, Van Aardenne J A. Impact of different emission inventories on simulated tropospheric ozone over China: A regional chemical transport model evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, 4(4): 877-887.
- [161] Ma J, Richter A, Burrows P B, et al. Comparison of model-simulated tropospheric NO₂ over China with GOME-satellite data. *Atmos Environ*, 2006, 40: 593-604.
- [162] 中国气象科学研究院. 中国气象科学研究院二十年(大气化学与大气环境). 1999: 28-33.
- [163] 孙明华, 徐大海, 朱蓉, 等. 城市空气臭氧污染业务预报方案研究. 气象, 2002, 28(4): 3-8.
- [164] 陈军明, 徐大海, 朱蓉. 遗传算法在点源扩散浓度反演排放源强中的应用. 气象, 2002, 28(9): 12-16.
- [165] 张恺, 徐大海, 朱蓉, 等. CAPPS 多箱模式中光化学模式的嵌套与城市大气臭氧数值预报. 应用气象学报, 2005, 16(1): 1-12.
- [166] 李世奎, 王木林, 胡二邦. 六氟化硫(SF₆)示踪剂及其在大气扩散中的应用. 气象学报, 1979, 37(2): 69-78.
- [167] 杨东贞, 肖锋. 两磷肥厂氟化物气体的污染调查及其扩散稀释规律的探讨 // 中央气象局气象科学研究院. 大气湍流扩散及污染气象论文集. 北京: 气象出版社, 1980: 21-33.
- [168] 全国中小型磷肥厂大气污染协作组. 丘陵地区磷肥厂含氟气体在大气中扩散问题的探讨. 环境科学, 1982, 3(3): 13-18.
- [169] 杨东贞. 对湛江化工厂 SO₂ 气体扩散问题的探讨. 气象, 1983(3): 16-19.
- [170] 烜铁林, 王木林, 郭相臣, 等. 街谷的大气扩散试验研究. 气象科学研究院院刊, 1987, 2(1): 67-73.
- [171] 烜铁林. 山区城市大气污染物传输扩散的数值模拟. 应用气象学报, 1991, 2(1): 1-12.
- [172] 周秀骥. 中国大气本底基准观象台进展总结报告. 北京: 气象出版社, 2005.
- [173] 中国气象科学研究院. 奋斗与辉煌的五十年. 2006: 133-134.

Review of Atmospheric Chemistry and Environment Research Work in Recent 30 Years

——In Commemoration of the 50 Anniversaries of CAMS Establishment

Ding Guoan Zheng Xiangdong Ma Jianzhong Liu Yu Yan Peng

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences , Center of Atmospheric Watch and Service , Key Laboratory
for Atmospheric Chemistry , China Meteorological Administration , Beijing 100081*)

Abstract

Research work associated with the atmospheric chemistry and environment undertaken in the CAMS in recent 30 years is reviewed. The work is mainly supported by the key projects from the National Natural Science Foundation and by the “973” project from the Ministry of Science and Technology of China. The main significantly creative achievements are as follows: The first discovery of the summer total ozone valley occurring over the Tibetan Plateau; with the consideration of the environment, ecosystem, climate as an integrated system, impacts from anthropogenic activities on the environment through changing the status of the ecosystem, and its influencing on the regional climate is better identified in China; understanding of the mechanisms of the atmospheric pollution in Beijing city and the methods of modulation of the pollution are much improved. The achievements of solving the critical difficulties of the atmospheric environmental problems in Beijing are creatively approached based on the 3-dimension observations, with the integrated analysis of statistics and dynamics, the surface and satellite observations, and the model simulations; the first continent Global Atmospheric Watch (GAW) baseline observatory is established at Mt Waliguan, Qinghai Province, initialing the GAW routine observations in China. In conclusion, the work of 30 years in CAMS contains almost all the important topics of the atmospheric chemistry and their frontier researching contexts. These topics are listed as greenhouse gases, total ozone, reactive gases, aerosols, acid rains, the development and applications of atmospheric chemistry model simulations, the forecast methods of air quality and the assessment of atmospheric environment etc. The advances of atmospheric chemistry in CAMS are much related to the constructions of monitoring network operated by the CMA. The establishments of monitoring networks of GAW, acid rain, total ozone, dust storm have provided CAMS with a common platform for atmospheric chemistry researches.

Key words : atmospheric chemistry ;atmospheric environment ;Chinese Academy of Meteorological Sciences