

王占山, 李晓倩, 王宗爽, 等. 空气质量模型 CMAQ 的国内外研究现状[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6L): 386-391. Wang Zhan-shan, Li Xiao-qian, Wang Zong-shuang, et al. Application status of models-3/CMAQ in environmental management[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(6L): 386-391.

# 空气质量模型CMAQ的国内外研究现状

王占山, 李晓倩, 王宗爽, 武雪芳\*, 车飞, 聂鹏

(中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 北京 100012)

**摘 要** 空气质量模型是支撑环境管理与决策的重要工具。文章系统地回顾了空气质量模型的发展历程, 重点介绍了多尺度空气质量模型 CMAQ(Community Multiscale Air Quality Modeling System)在模拟预测臭氧、氮氧化物、硫氧化物和颗粒物等方面的国内外应用研究现状, 同时指出 CMAQ 模型存在的问题、在我国环境管理中的应用以及未来空气质量模型的发展方向。研究表明, 国内外对 CMAQ 模型的应用研究主要体现在 3 个方面: 评价模型的模拟性能、模拟预测空气中污染物浓度以及研究各污染物的来源、产生机理及传输扩散过程。

**关键词** CMAQ; 空气质量;  $PM_{2.5}$

中图分类号: X51 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.6L.091 文章编号: 1003-6504(2013)6L-0386-06

## Application Status of Models-3/CMAQ in Environmental Management

WANG Zhan-shan, LI Xiao-qian, WANG Zong-shuang, WU Xue-fang\*, Che Fei, Nie-peng

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, State Key Laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012, China)

**Abstract**: Air quality model is an important tool to support environmental management and decision-making. The development of air quality model is introduced, especially the application and research at home and abroad of CMAQ in simulation and prediction of ozone, nitrogen oxides, sulfur oxides and particulate matter, also some disadvantages and application in environmental management of China as well as future development direction of air quality model are pointed out. It shows in that study that CMAQ model are mainly reflected in three aspects at home and abroad.

**Key words**: CMAQ; air quality;  $PM_{2.5}$

自工业革命以来, 西方国家对矿石燃料的大量使用造成了空气污染的不断加重。空气污染不仅会危害人类的身体健康, 而且会对社会的经济生产甚至地球的生态平衡造成严重的危害。近年来我国为快速发展经济不断地开发大型工业区和扩大能源与交通的规模, 造成了大气污染问题日益严重<sup>[1]</sup>。为了进一步改善空气质量, 我国新的空气质量标准在 2012 年出台, 不但收严了空气中可吸入颗粒物  $PM_{10}$  和  $NO_2$  的标准限值, 而且首次将可入肺颗粒物  $PM_{2.5}$  纳入了检测项目<sup>[2]</sup>, 表明空气质量已经成为国家和公众关注的热点问题。

伴随着空气污染问题的日益突出, 人们对空气质量的关注和对空气质量进行准确预测的需求也日渐显现。自 20 世纪 70 年代以来, 就有各种预测工具被大量的开发并用于空气质量模拟工作, 其中, 空气质量模型系统通过计算机模拟计算各种尺度大气污染

物输送与沉降规律, 具有时间和空间的连续性, 是方便有效的预测空气质量的工具。目前, 空气质量模型模拟系统已广泛应用于对各种大气污染物在不同尺度下的不同类型污染过程进行模拟, 成为大气环境研究中不可缺少的组成部分<sup>[3]</sup>。本文阐述了空气质量模型的发展历程, 并对目前国内外广泛使用的多尺度空气质量模型 CMAQ(Community Multiscale Air Quality Modeling System)的应用研究进行了重点探讨。

### 1 空气质量模型的发展历程

根据模型设计理念与模型参数的差异, 空气质量模型的发展大体分为三代<sup>[4]</sup>。

第一代空气质量模型主要包括基于质量守恒定律的箱模型、基于湍流扩散统计理论的高斯模型和拉格朗日轨迹模型, 代表模型有 ISC (Industrial Source Complex)<sup>[5]</sup>、EKMA (Empirical Kinetics Modeling Ap-

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://hjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) [hjkyjs@126.com](mailto:hjkyjs@126.com)

收稿日期 2013-03-05; 修回 2013-04-09

作者简介: 王占山(1971-), 男, 硕士研究生, 主要从事大气环境模拟研究, (电子信箱) [18701650609@163.com](mailto:18701650609@163.com)。

proach)<sup>[6]</sup> 以及 CALPUFF (The CALPUFF Modeling System)<sup>[7]</sup>模型等。这些模型在运行时主要考虑个别污染物,在估算下风向的环境浓度时用的是物理输送算法,模型的浓度计算在水平方向和垂直方向上都采用高斯分布假定,湍流分类和扩散参数采用离散化的经验分类方法。这些模型被广泛应用于一次污染物的影响预测和控制措施的优化<sup>[8]</sup>。20 世纪 70 年代末 80 年代初,随着对大气边界层湍流特征的研究,研究者们发现了高斯模型对许多方面的问题都无法解答,这逐渐推动了第二代空气质量模型的发展。

第二代模型中加入了比较复杂的气象模型和非线性反应机制,选定的区域被分成许多三维网格单元,模型可以模拟每个单元格大气层中的化学变化过程、云雾过程以及位于该网格周边的其他单元格内的大气状况。代表模型有 ADMS(Atmospheric Dispersion Modelling System)<sup>[9]</sup>、AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model)<sup>[10]</sup>、CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions)<sup>[11]</sup>、UAM (Urban Airshed Model)<sup>[12]</sup>等。第二代的空气质量模型在设计上仅考虑了单一的大气污染问题,而实际上大气中各污染物间具有相当复杂的反应,气态和固态之间也有相互转化的过程。

为了将所有的大气问题均考虑到模型之中,即基于所谓“一个大气”<sup>[13]</sup>的概念,美国环保局组织研制了第三代空气质量模型,统称为 Models-3(Third-generation Air Quality Modeling System)。目前常用的模型有美国的 CMAQ 模型、法国的 CHIMERE 模型<sup>[14]</sup>、英国的“Your Air”系统和 NAME 系统、荷兰的 LOTOS-EUROS 模式<sup>[15-16]</sup>以及中国的 NAQPMS(嵌套网格空气质量预报模式系统)<sup>[17]</sup>,其中 CMAQ 模型是美国环保局推荐使用的空气质量模型,在国内外中的应用研究也比较多。

## 2 Models-3/CMAQ 模型介绍

CMAQ 由美国环保局于 1998 年 6 月首次发布,经过十几年的研究发展,已经更新到 5.0.1 版本。CMAQ 在模拟过程中能将天气系统中、小尺度气象过程对污染物的输送、扩散、转化和迁移过程的影响融为一体考虑,同时兼顾了区域与城市尺度之间大气污染物的相互影响以及污染物在大气中的气相各种化学过程,包括液相化学过程、非均相化学过程、气溶胶过程和干湿沉积过程对浓度分布的影响。CMAQ 模型由 5 个主要模块<sup>[18]</sup>组成,如图 1,其核心是化学传输模块 CCTM(CMAQ Chemical-Transport Model Processor),可以模拟污染物的传输过程、化学过程和沉降过

程;初始值模块 ICON(Initial Conditions Processor)和边界值模块 BCON (Boundary Conditions Processor)为 CCTM 提供污染物初始场和边界场;光化学分解率模块 JPROC(Photolysis Rate Processor)计算光化学分解率;气象-化学接口模块 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)是气象模型和 CCTM 的接口,把气象数据转化为 CCTM 可识别的数据格式。其中 CCTM 模块具有可扩充性,例如加入云过程模块、扩散与传输模块和气溶胶模块等,操作者可以选择在 CMAQ 中加入这些模块以便于模型在不同区域的模拟。CMAQ 的数值计算所需的气象场由气象模型提供,如中尺度气象模型 MM5 (Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)<sup>[19]</sup> 和 WRF (Weather Research and Forecasting Model)<sup>[20]</sup>;所需的源清单由排放处理模型提供,如 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions)<sup>[21]</sup>等。CMAQ 模型可用于日常的空气质量预报,如区域与城市尺度对流层臭氧、大气气溶胶、能见度和其他空气污染物的预报,还可以用来评估污染物减排效果,预测环境控制策略对空气质量的影响,从而制定最佳的可行性方案。

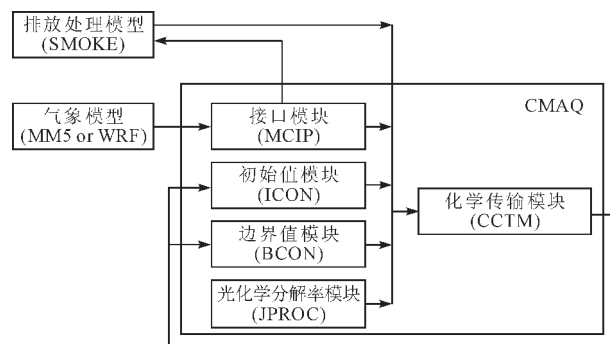


图1 CMAQ模型流程图

## 3 Models-3/CMAQ 的应用与研究现状

目前国内外对 CMAQ 的应用研究主要分为 3 个方面:一是通过污染物的模拟值与观测值的对比来评价模型的模拟性能,探索误差的形成原因以及寻求提高模拟精确度的方法;二是通过对空气中各种污染物质的浓度的模拟来评价空气的污染程度,预测未来的空气状况或者评估污染物减排措施带来的空气质量的改善;三是研究空气中各污染物的来源和产生机理以及传输和扩散过程,揭示大气污染物的跨地区传输性,为有效治理大气污染提供科学依据。CMAQ 最多可模拟预测 80 多种污染物,研究最多的常规污染物有臭氧、氮氧化物和硫氧化物以及大气颗粒物等。本文按照不同的污染物质,对 CMAQ 在国内外中的应用研究分别进行了探讨和总结。

### 3.1 在臭氧研究中的应用

在臭氧的来源和生成机理方面, X.V. Francis 等<sup>[22]</sup>应用 CMAQ 模型模拟了 2003 年 8 月份英国东南部地区臭氧浓度, 研究发现高压天气系统以及近地面的西风和东风的汇和是导致臭氧浓度过高的气象因素。Mai Khiem 等<sup>[23]</sup>应用 CMAQ 模型对 2005 年夏季日本关东地区在不同天气条件下的臭氧的形成进行了分析, 研究发现, 臭氧的浓度是由大气的水平传输、垂直扩散、干沉降和化学过程共同影响的, 大气的传输和扩散过程能增加该地区臭氧的浓度, 而干沉降和化学过程则主要消耗臭氧, 分析认为, 风向和风速能决定臭氧以及形成臭氧前体物的传输过程, 是决定日本关东地区臭氧浓度的重要的气象因素。高怡等<sup>[24]</sup>应用 CMAQ 模型探讨了北京奥运会期间北京及周边地区在不同的污染控制措施下臭氧浓度的变化, 研究发现奥运会期间的污染控制政策能明显降低空气中臭氧的浓度, 但在太阳辐射较强、气温较高或受南风天气影响时, 臭氧仍易达到较高浓度, 这一方面是由于自然因素使臭氧更容易生成, 另一方面周边地区高浓度的臭氧更容易传输到北京地区。

在模型模拟性能的评价方面, Steve C. Smyth 等<sup>[25]</sup>用 CMAQ 模拟了加拿大温哥华地区的  $O_3$  浓度并与观测数据进行了对比, 研究发现 CMAQ 模型能较好地模拟出  $O_3$  的日变化规律和空间分布规律, 特别是对于  $O_3$  峰值浓度以及峰值出现时间的模拟, 与观测数据极为接近, 表明 CMAQ 模型对  $O_3$  的模拟具有较高的准确度。沈劲等<sup>[26]</sup>在应用 CMAQ 模型模拟珠江三角洲 2004 年 10 月的臭氧浓度时发现, 总体上 CMAQ 的臭氧模拟浓度比观测值低, 但能够较好地模拟出珠江三角洲研究期间大多数检测站点的臭氧浓度水平和变化趋势, 研究还发现 CMAQ 模型设定的臭氧的光解速率常数偏低, 这会增大模拟的误差, 建议新版本的 CMAQ 应加强相关的研究以提高其对臭氧模拟的准确性。

### 3.2 在氮氧化物和硫氧化物研究中的应用

在模拟氮氧化物和硫氧化物浓度以及探索氮氧化物和硫氧化物的来源和生成机理方面, 朱凌云等<sup>[27]</sup>用 CMAQ 模型模拟了 2005 年东亚地区硝酸盐湿沉降的时空分布, 从模拟结果可以看出东亚地区硝酸盐湿沉降呈现明显的季节变化特征, 夏季的沉降量最高。Litao Wang 等<sup>[28]</sup>用 CMAQ 模型模拟了 2010 年中国东部地区的  $SO_2$  和  $NO_x$  的浓度, 并以此为指标来评估了中国由于实施污染物减排政策带来的空气质量的改善, 模拟结果显示, 采取了减排政策后的  $SO_2$  和  $NO_x$  的浓度将比没有实施减排政策的浓度减少 30%~

60%, 这表明实施排放控制政策会取得明显的效果。王书肖等<sup>[29]</sup>用 CMAQ 模型模拟了 2005 年北京地区空气中  $SO_2$  的浓度, 并由此研究了北京地区的燃煤对空气质量的影响, 研究发现, 1 月份北京市主要的燃煤源是采暖锅炉, 对各监测站  $SO_2$  的浓度的贡献在 70% 以上, 7 月份北京市主要的燃煤源是电厂, 对  $SO_2$  的贡献在 40%~50% 左右, 结果表明燃煤的排放是城区  $SO_2$  的主要来源。张艳等<sup>[30]</sup>采用 CMAQ 模型模拟了 2004 年上海地区空气中  $SO_2$  的浓度及来源, 研究结果表明外地排放源对上海地区的  $SO_2$  有一定的贡献率, 要想治理地区性污染, 必须实施区域大气的联合控制。

在模型模拟性能的评价方面, Rafael Borge 等<sup>[31]</sup>研究了改变氮氧化物和硫氧化物的边界条件对 CMAQ 模型模拟结果的影响, 研究发现使用由模型生成的动态的边界值能提高 CMAQ 模拟的准确性。K. M. Han 等<sup>[32]</sup>应用 CMAQ 模型模拟了 2003 年朝鲜半岛对流层中的氮氧化物排放情况并与观测数据进行了对比, 研究发现模拟结果比观测数据要高出 1.38~1.87 倍, 分析认为这可能是由于关于朝鲜的经济活动和能源消耗的资料不足而导致的氮氧化物的排放通量的不确定性造成的。

### 3.3 在颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 研究中的应用

在研究颗粒物的来源方面, 陈训来等<sup>[33]</sup>应用 CMAQ 模型研究了 2004 年 9 月珠江三角洲的一次灰霾天气中  $PM_{10}$  的来源, 结果表明, 在这次灰霾过程中, 点源对近地面  $PM_{10}$  浓度的贡献主要集中在珠江口西岸的城市群区域, 机动车移动源污染物的排放则在珠江三角洲地区形成了 3 个  $PM_{10}$  浓度的高值中心, 与珠江三角洲地区机动车的地理分布特征和广东省高速公路的分布比较一致。在研究颗粒物的传输方面, 朱凌云等<sup>[34]</sup>用 CMAQ 模型研究了山西省排放的大气颗粒物的传输情况, 结果表明, 山西省排放的颗粒物可以进入北京地区, 对北京市近地面  $PM_{10}$  的浓度产生一定影响。胡晓宇等<sup>[35]</sup>用 CMAQ 模型模拟了珠江三角洲地区大气中  $PM_{10}$  的传输过程, 研究发现珠三角地区已形成  $PM_{10}$  区域性污染的特点, 外来源对珠三角地区的  $PM_{10}$  的浓度有一定贡献, 污染物的城市间输送已成为影响珠三角地区空气质量的重要因素, 只有实施城市间的联防联控才能有效防治地区性大气污染。在研究颗粒物的沉降过程方面, 马芳<sup>[36]</sup>在用 CMAQ 模型模拟 2005 年河北南部空气中  $PM_{10}$  的传输和沉降过程时发现, 夏季非采暖期  $PM_{10}$  的浓度明显小于冬季采暖期, 主要原因有 2 点: 一是化石燃料的燃烧减少, 颗粒物的排放减少; 二是夏季降雨丰富, 使得部分  $PM_{10}$  能随着雨水一起沉降到地面, 因此污染程度



明显好转。

在评价模型的模拟性能方面,Ulas Im 等<sup>[37]</sup>在用 CMAQ 模型模拟 2008 年冬季伊斯坦布尔的颗粒物排放时发现,相比于改变二次颗粒物的排放,改变模型输入数据中一次颗粒物的源排放对输出的气溶胶浓度有更大的改变,表明一次源颗粒物的排放对本地的气溶胶浓度有较大的影响。

### 3.4 在其他大气污染物研究中的应用

除了对臭氧、氮氧化物、硫氧化物和颗粒物等常规污染物的应用研究外,CMAQ 模型在二噁英和放射性物质方面也有较广泛的应用研究,这些研究都有助于了解大气污染的严重情况和污染的来源及机理和制定合理有效的污染物减排措施。

王鹏飞等<sup>[38]</sup>应用 CMAQ 模型模拟了日本福岛核电站泄露的放射性物质 Cs-137 的传输扩散情况,研究发现,Cs-137 在近地面层基本上从福岛地区向东北、偏东和东南 3 个方向扩散传输。张钰<sup>[39]</sup>应用 CMAQ 模型研究了 2006 年长江三角洲地区二噁英在大气中的输送、转化和沉降等演变过程,研究发现,长三角地区的二噁英类污染物存在着明显的长距离输送特征和区域影响;同时还发现二噁英类物质浓度分布四季分明,冬季大气中的浓度明显高于夏季,原因是冬季污染源的排放量比较多而且由于气象原因不容易扩散,同时夏季比较多的降雨能有效去除二噁英。

## 4 CMAQ 存在的问题

在 CMAQ 模型大量被应用在国内外的各个领域的同时,专家们也发现了它在预测过程中的不足之处,比如说某些版本存在的质量不守恒的问题,模型对某些物质的参数设置不合理以及模拟结果存在系统性误差等。

(1)CMAQ4.3 版本存在质量不守恒缺陷。Yong-tao Hu 等<sup>[40]</sup>通过研究发现,CMAQ4.3 的版本中在模拟过程中有质量不守恒的缺陷,这会增大其模拟结果的误差,CMAQ4.4 在一定程度上弥补了这个缺陷,研究还发现通过调整垂直风速的参数来重组风场的初始条件,可能补救这个缺陷。

(2)模型设置的臭氧光解速率常数偏低。沈劲等<sup>[26]</sup>通过研究发现,CMAQ 估算的臭氧光解的速率常数偏低,导致化学过程对臭氧生产的贡献偏低,是造成其臭氧模拟浓度偏低的原因之一,今后应继续加强相关的研究以提高其对臭氧模拟的准确性。

(3)模拟结果偏低。刘凤刚<sup>[41]</sup>将污染物的历史监测值和 CMAQ 的预报值整合建立了一个数据库,通过对比研究发现,CMAQ 的预测结果存在比观测数据

偏低的“系统性”误差。

## 5 结论与展望

CMAQ 模型结构严谨,体系完整,系统也十分灵活,还具有良好的可扩充性,能与其他的应用软件结合使用。CMAQ 能合理准确预测空气中的各种常规污染物浓度,并对其在不同尺度下的不同类型污染过程进行模拟,可以有效支持环境管理与决策。Models-3/CMAQ 模型模拟系统可以利用历年的统计和监测资料,对我国的重点污染区域和重点污染源进行识别,分析重点区域的环境质量变化趋势和污染治理效果;CMAQ 模型系统还可以用来进行区域环境影响评价,从宏观层次对区域大气质量环境进行评价和预测,比较不同的区域污染削减方案的环境影响,为我国的大气环境规划管理提供依据,并应用情景分析和优化规划相结合的方法,分析我国的经济增长速度、工业布局 and 产业结构的改变与调整对环境造成的影响,由此提供环境与经济持续发展的决策支持。

空气质量模型仍处于不断的更新与发展中,要模拟预测出目前以区域性大气复合污染为特征的空气质量还需进一步开发建立出一个嵌套诸多城市群的、多过程的以阐明区域性各种复合污染(如沙尘暴、光化学污染、城市可悬浮颗粒物、酸雨等)的变化规律及其区域影响的模型,从而为合理制定污染源排放控制对策和城区科学规划提供更准确的基础数据。美国环保局正在研制的第四代空气质量模型系统,将尽可能考虑气圈、水圈和生物圈之间的相互作用,以便能更全面的对整个生态系统中的污染物的输送和消亡进行模拟。

### [参考文献]

- [1] 邢文听,田良,鲁然英,等. 工业区大气污染控制策略分析与探讨[J]. 资源环境与发展, 2006(2): 35-38.  
Xing Wen-ting, Tian Liang, Lu Ran-ying, et al. Control policy analysis and discussion of air pollution from industrial zone [J]. Env Ironment and Sustainable Development, 2006 (2): 35-38. (in Chinese)
- [2] 徐映如,王丹侠,张建文,等. PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 危害、治理及标准体系概况[J]. 职业与健康, 2013, 29(1): 117-119.  
Xu Yin-ru, Wang Dan-xia, Zhang Jian-wen, et al. General situation for the hazards, control and evaluation standard system of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> [J]. Occup and Health, 2013, 29(1): 117-119. (in Chinese)
- [3] Amit P Kesarkar, Mohit Dalvi, Akshara Kaginalkar, et al. Coupling of the weather research and forecasting model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM<sub>10</sub> dispersion over Pune, India [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(9): 1976-1988.

- [4] 姚增权. 国外空气质量模式研究现状及展望[J]. 电力环境保护, 1999, 15(3): 27-31.  
Yao Zeng-quan. Research situation and prospect of foreign air quality model [J]. Environmental Protection for Electric Power, 1999, 15(3): 27-31. (in Chinese)
- [5] 曹春艳. 环境空气质量管理模式研究进展 [J]. 工业安全与环保, 2007, 33(12): 32-35.  
Cao Chun-yan. Research progress of atmospheric environmental management models [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2007, 33(12): 32-35. (in Chinese)
- [6] 石玉珍, 王庚辰, 徐永福. 北京市城近郊区光化学烟雾模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 84-92.  
Shi Yu-zhen, Wang Gen-chen, Xu Yong-fu. Simulation study of photochemical smog in Beijing urban and suburban areas[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(1): 84-92. (in Chinese)
- [7] 伯鑫, 丁峰, 徐鹤. 大气扩散 CALPUFF 模型技术综述[J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(3): 9-13.  
Bo Xin, Ding Feng, Xu He. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009, 21(3): 9-13. (in Chinese)
- [8] 聂邦胜. 国内外常用的空气质量模式介绍 [J]. 江苏环境科技, 2008, 21(1): 1-2.  
Nie Bang-sheng. Introduction of domestic and foreign common air quality model [J]. Ocean Technology, 2008, 21(1): 1-2. (in Chinese)
- [9] 孙大伟. 新一代大气扩散模型(ADMS)应用研究[J]. 环境保护科学, 2004, 30(121): 67-69.  
Sun Da-wei. Apply research on new generation atmosphere diffusion model (ADMS)[J]. Environmental Protection Science, 2004, 30(121): 67-69. (in Chinese)
- [10] 王海超, 焦文玲, 邹平华. AERMOD 大气扩散模型研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(11): 115-119.  
Wang Hai-chao, Jiao Wen-ling, Zou Ping-hua. Development of AERMOD dispersion model [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(11): 115-119. (in Chinese)
- [11] 刘峰, 张远航, 苏杭, 等. 大气化学传输模式 CAMx 的伴随模式: 构建及应用 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6): 764-770.  
Liu Feng, Zhang Yuan-hang, Su Hang, et al. Adjoint model of atmospheric chemistry transport model CAMx: construction and application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(6): 764-770. (in Chinese)
- [12] 颜鹏, 李维亮, 秦瑜. 近年来大气气溶胶模式研究综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 629-640.  
Yan Peng, Li Wei-liang, Qin Yu. A review of the current development of atmospheric aerosol models [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2004, 15 (5): 629-640. (in Chinese)
- [13] 付维雅. 第三代空气质量模型的研究与应用 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2010: 5.  
Fu Wei-ya. Research and Application of the Third Generation of Air Quality Models[D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2010: 5. (in Chinese)
- [14] Schmidt H, Derognat C, Vautard R, et al. A comparison of simulated and observed ozone mixing ratios for the summer of 1998 in Western Europe [J]. Atmos Environ, 2001, 35: 6277-6297.
- [15] Kukkonen J, Klein T, Karatzas K, et al. COST ES0602: Towards a european network on chemical weather forecasting and information systems[J]. Adv Sci Res, 2009, 3: 27-33.
- [16] Vautard R, Builtjes PHJ, Thunis P, et al. Evaluation and intercomparison of ozone and PM<sub>10</sub> simulations by several chemistry transport models over four European cities within the City Delta project[J]. Atmos Environ, 2007, 41:173-188.
- [17] 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用[J]. 大气科学, 2006, 30: 778-790.  
Wang Zi-fa, Xie Fu-ying, Wang Xi-quan, et al. Development and application of nested air quality prediction modeling system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30: 778-790. (in Chinese)
- [18] 孙龙. CMAQ 模型的并行效率优化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011: 16.  
Sun Long. Parallel Efficiency Optimization Study of CMAQ [D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2011: 16. (in Chinese)
- [19] 张金善, 钟中, 黄瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介 [J]. 海洋预报, 2005, 22(1).  
Zhang Jin-shan, Zhong Zhong, Huang Jin. An introduction to meso-scale model MM5 [J]. Marine Forecasts, 2005, 22 (1). (in Chinese)
- [20] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1191-1199.  
Wang Xiao-jun, Ma Hao. Progress of application of the weather research and forecast(WRF) model in China[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(11): 1191-1199. (in Chinese)
- [21] Cempd, Unc.Smoke v2.5 User's Manual [EB/OL]. Chapel Hill: University of North Carolina, 2010.
- [22] X V Francis, C Chemel, R S Sokhi, et al. Mechanisms responsible for the build-up of ozone over south east england during the August 2003 heatwave [J]. Atmospheric Environment, 2011(45): 6880-6890.
- [23] Mai Khiem, Ryoza Ooka, Hong Huang, et al. A numerical study of summer ozone concentration over the Kanto area of Japan using the MM5/CMAQ model [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(2): 236-246.
- [24] 高怡, 张美根, 朱凌云, 等. 2008 年奥运会期间北京地区大气 O<sub>3</sub> 浓度模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5):643-651.  
Gao Yi, Zhang Mei-gen, Zhu Ling-yun, et al. Numerical

- analysis of atmospheric  $O_3$  concentrations over Beijing during the 2008 Olympic Games[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(5): 643–651. (in Chinese)
- [25] Steve C Smyth, Weimin Jiang, Dazhong Yin, et al. Evaluation of CMAQ  $O_3$  and  $PM_{2.5}$  performance using Pacific 2001 measurement data [J]. Atmospheric Environment, 2006(40): 2735–2749.
- [26] 沈劲, 王雪松, 李金凤, 等. Models-3/CMAQ 和 CAMx 对珠江三角洲臭氧污染模拟的比较分析[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(11): 1750–1762.
- Shen Jin, Wang Xue-song, Li Jin-feng, et al. Evaluation and intercomparison of ozone simulations by Models-3/CMAQ and CAMx over Pearl River Delta [J]. Scientia Sinica(Chimica), 2011, 41(11): 1750–1762. (in Chinese)
- [27] 朱凌云, 张美根, 高丽洁, 等. 东亚地区硝酸盐湿沉降的数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(1): 76–79.
- Zhu Lin-yun, Zhang Mei-gen, Gao Li-jie, et al. Numerical simulation of seasonal variation in nitrate wet deposition over East Asia [J]. China Powder Science and Technology, 2010, 16(1): 76–79. (in Chinese)
- [28] Litao Wang, Carey Jang, Yang Zhang, et al. Assessment of air quality benefits from national air pollution control policies in China [J]. Atmospheric Environment, 2010 (44): 3442–3448.
- [29] 王书肖, 陈瑶晟, 许嘉钰, 等. 北京市燃煤的空气质量影响及其控制研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 152–158.
- Wang Shu-xiao, Chen Yao-sheng, Xu Jia-yu, et al. Study on air quality impacts and control strategies of coal combustion in Beijing [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 152–158. (in Chinese)
- [30] 张艳, 余琦, 伏晴艳, 等. 长江三角洲区域输送对上海市空气质量影响的特征分析 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 914–923.
- Zhang Yan, Yu Qi, Fu Qing-yan, et al. Impact of the transport of atmospheric pollutants from the Yangtze River Delta on the air quality in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2010, 30(7): 914–923. (in Chinese)
- [31] Rafael Borge, Javier Lopez, Julio Lumbreras, et al. Influence of boundary conditions on CMAQ simulations over the Iberian Peninsula [J]. Atmospheric Environment, 2010(44): 2681–2695.
- [32] K M Han, C K Lee, J Lee, et al. A comparison study between model-predicted and OMI-retrieved tropospheric  $NO_2$  columns over the Korean peninsula[J]. Atmospheric Environment, 2011(45): 2962–2971.
- [33] 陈训来, 陈元昭, 王明洁, 等. 点源和移动源对珠江三角洲灰霾天气影响的数值研究[A]. 第 26 届中国气象学会年会大气成分与天气气候及环境变化分会场论文集 [C]. 北京, 2009.
- Chen Xu-lai, Chen Yuan-zhao, Wang Ming-jie, et al. Study on the Impact of Point and Mobile Sources on Haze of Pearl River Delta [A]. Proceedings of the 26th Session of the China Meteorological Society of the Composition of the Atmosphere and Weather and Climate and Environmental Change Venue[C]. Beijing, 2009. (in Chinese)
- [34] 朱凌云, 蔡菊珍, 张美根, 等. 山西省排放的大气颗粒物向北京地区输送的个例分析 [A]. 第九届全国气溶胶会议暨第三届海峡两岸气溶胶技术研讨会[C]. 广州, 2007.
- Zhu Ling-yun, Cai Ju-zhen, Zhang Mei-gen, et al. Case Study on Transport of Airborne Particulate Matters originated from Shanxi Province to Beijing Area [A]. The Ninth National Aerosol Conference and the Third Cross-strait Aerosol Technology Seminar[C]. Guangzhou, 2007. (in Chinese)
- [35] 胡晓宇, 李云鹏, 李金凤, 等. 珠江三角洲城市群  $PM_{10}$  的相互影响研究[J]. 北京大学学报, 2011, 47(3): 519–524.
- Hu Xiao-yu, Li Yun-peng, Li Jin-feng, et al. Interaction of ambient  $PM_{10}$  among the cities over the Pearl River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(3): 519–524. (in Chinese)
- [36] 马芳. 河北南部地区  $PM_{10}$  污染的模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2011: 34–53.
- Ma Fang. The Study on  $PM_{10}$  Pollution in the Southern Area of Hebei[D]. Handan: Hebei University of Engineering Thesis, 2011: 34–53. (in Chinese)
- [37] Ulas Im, Kostandinos Markakis, Alper Unal, et al. Study of a winter PM episode in Istanbul using the high resolution WRF/CMAQ modeling system [J]. Atmospheric Environment, 2010(44): 3085–3094.
- [38] 王鹏飞, 费建芳, 程小平, 等. 福岛核泄漏物质在大气中输送扩散的数值模拟[A]. 第 28 届中国气象学会年会-S17 第三届研究生年会[C]. 北京, 2011.
- Wang Peng-fei, Fei Jian-fang, Cheng Xiao-ping, et al. Numerical Simulation of Diffusion Fukushima Nuclear Leak Substances Are Transported in the Atmosphere [A]. 28th Chinese Meteorological Society Annual Meeting[C]. Beijing, 2011. (in Chinese)
- [39] 张钰. 长江三角洲二噁英类物质大气输送、沉降数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011: 20–49.
- Zhang Yu. Simulation of the Transport and Deposition of PCDD/Fs in the Atmospheric in Yangtze River Delta Region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science Thesis, 2011. (in Chinese)
- [40] Yongtao Hu, M Talat Odman, Armistead G. Russell. Mass conservation in the community multiscale air quality model [J]. Atmospheric Environment, 2006(40): 1199–1204.
- [41] 刘凤刚. CMAQ 预报数据的管理与订正分析[J]. 天津职业院校联合学报, 2007, 9(5).
- Liu Feng-gang. Analysis on the management and revision of forecasting data of CMAQ[J]. Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2007, 9(5). (in Chinese)