

文章编号: 1673- 9469(2010) 04- 0046- 06

基于 MM5- Models- 3/CMAQ 的中国地区大气污染模拟

马 芳, 王丽涛, 潘雪梅

(河北工程大学 城市建设学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 采用 MM5- Models- 3/CMAQ 区域空气质量模拟系统, 以 2005 年 1、4、7 和 10 月为模拟时段, 对中国地区的 SO_2 、 NO_2 和颗粒物 (PM) 等大气污染物的浓度进行了模拟, 应用卫星遥感数据, 对包括 NO_2 柱浓度和气溶胶光学厚度 (AOD) 等模拟结果进行了进一步的验证。从模拟结果与监测资料对比分析中可以看出, 该模式能较好地模拟出几种污染物的空间分布格局, 尤其是我国的京津冀地区, 长江三角洲地区和珠江三角洲地区等三大经济圈的模拟结果与监测结果较吻合。中国地区的大气污染呈现出区域性的特征, 且在时空分布上东西部地区存在明显的差异, 经济发达地区的污染较为严重。CMAQ 计算结果与卫星遥感数据有很好的相关性, 该模拟系统对中国地区的大气污染物特征具有良好的模拟能力。

关键词: 空气污染; 中国; CMAQ

中图分类号: X51

文献标识码: A

An application of MM5- Models- 3/CMAQ to simulate air pollutant characteristics in China

MA Fang, WANG Li-tao, PAN Xue-mei

(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: MM5- Models- 3/CMAQ was applied to simulate the distribution of SO_2 , NO_2 and PM in China by taking the January, April, July, October in 2005 for example. The comparison between simulation results and monitoring data show that this model can simulate the spatial distribution patterns of pollutants preferably, simulation results and the monitoring results are identical, especially for the Beijing- Tianjin- Hebei region, Yangtze river delta and pearl river delta etc. In order to make up for the deficiency of monitoring data, the study applied satellite remote sensing data to the further verification of the simulation result, which include NO_2 column concentration and aerosols optical thickness (AOD). The results showed that experimental results of the CMAQ calculation results were highly correlated to those of the satellite remote sensing data; this simulation system is a very good way to simulate the characteristics of the atmospheric pollutants in China.

Key words: air pollution; China; CMAQ

“十五”以来, 我国经济以平均每年 9.48% 的速度保持快速增长, 与此同时对能源的需求也在逐步增大, 从而进一步导致了污染物排放量迅速增加。“十五”期间, 中国的环保投资比“九五” (1995- 2000 年) 增加了 100%^[1]。而在一些重点地区, 政府的环保力度更大, 大量高污染、低能源

效率的企业被关闭, 环境基础设施的建设逐步加快。

多尺度空气质量模型 (Community Multi- Scale Air Quality, CMAQ) 是美国环境保护局开发的多尺度空气质量模型, 已被广泛用于研究多种空气污染物形成、运输及评估。张美根等^[2- 5] 利用 CMAQ

模型模拟东亚地区二氧化硫、硫酸盐、硝酸盐、氨、有机碳和总悬浮微粒的浓度变化情况等。在区域尺度的模拟方面, 以 2008 年北京奥运会的空气质量为研究目标, Chen 等^[6]、Cheng 等^[7]、Streets 等^[8]、Wang 等^[9] 分别针对周边地区污染对北京大气质量影响进行了研究; 李莉等^[10] 对长三角区域大气污染物特征及运输情况进行了研究, 冯业荣等^[11] 对珠江三角洲空气污染的特征进行了数值模拟研究。本文以中国地区的空气质量为研究对象, 采用 MM5- Models- 3/CMAQ 区域空气质量模拟系统, 以 2005 年 1、4、7 和 10 月为模拟时段, 对 SO_2 、 NO_2 和颗粒物(PM) 等大气污染物的浓度进行了模拟, 并与实际的监测数据进行对比验证。

1 模型设置和数据输入

1.1 模型设置

Models- 3/CMAQ 是美国环保局开发的区域多尺度空气质量模型, CMAQ 为 Models3 的核心模块, 可同时模拟多种空气污染及其相互转化过程, 如 O_3 、酸沉降、能见度及 PM 在整个对流层的情况。Byun 和 Ching 等^[12] 针对 CMAQ 中化学转化和运输过程进行了详细的描述。它的模拟范围可以从区域扩大到大陆半球的空间尺度。

本研究采用第五代中尺度气象模式 MM5 为 CMAQ 提供气象场。在 MM5 模式计算中, 地形和土地利用数据来自美国地质调查局(USGS) 数据库。MM5 所需的气象背景场选用美国环境预报中心(NCEP) 提供的全球 1×1 度分辨率的网格数据。为了提高模拟的准确率, 使用四维同化方案, 所需的气象观测数据均来自中国国家气象中心。NCEP 最后的分析数据作为 MM5 模式的初始条件。

1.2 模拟域和模拟时段

模拟区域采用 36km 的网格, 覆盖中国地区和东亚的一部分(图 1)。地图采用 lambert 投影, 两条标准纬线分别为北纬 25°N 和 40°N 。模拟区域以(34°N , 110°E) 为中心, 西南角的坐标是($x = -2\,934\text{km}$, $y = -1\,728\text{km}$)。模拟时段 2005 年 1、4、7 和 10 月, 以代表 2005 年的 4 个季节。

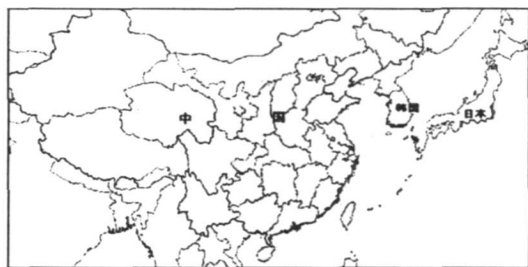


图1 Models-3/CMAQ 模拟区域

Fig.1 The Models-3/CMAQ modeling domain

1.3 源排放清单

源排放清单来自于 Streets 等人的研究^[13-14], 污染物包括 SO_2 、氮氧化物(NO_x)、CO 和非甲烷挥发性有机化合物(NMVOC) 和 4 种颗粒物 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、元素碳(BC) 和有机碳(OC)。在本清单编制时, 可获得的中国各省区的统计数据大多更新到 2004 年。因此, 以 2004 年的数据为基础, 外推计算 2005 年的排放量; 方法学体系参考文献^[15]。

2 模型验证及结果分析

2.1 地面观测数据

目前, 可用于模型评价的地面观测数据比较少, 对公众发布的空气质量数据是由中国 47 个主要城市的地方政府每日发布的空气污染指数(Air Pollution Index, API) 的报告。空气污染指数计算方法可以参考惠学香针对 API 计算的改进^[16], 通过 API 可以反算主要污染物的浓度水平^[17-18]。

以下为中国 31 个省会城市的 CMAQ 模拟结果和 API 反算的浓度水平的对比。在这些城市中, PM_{10} 是主要的空气污染物, 因此可用模拟的 API 和实际监测的 PM_{10} 浓度进行比较评价。模拟值为城市中心所在的网格的浓度。

从图 2 可以看出, 该模型较好的再现了中国中部和东部城市 PM_{10} 的污染水平, 特别是四川, 湖北, 湖南, 安徽, 江西, 浙江, 城市有上海, 重庆以及长江沿岸地区。这些城市四个月标准平均偏差为 -8% 和 -25% 。有两个地区的 PM_{10} 浓度被低估, 一是在中国西北地区, 包括新疆, 青海, 西藏, 这些地区扬尘的浓度贡献较高。在 CMAQ 当前版本并

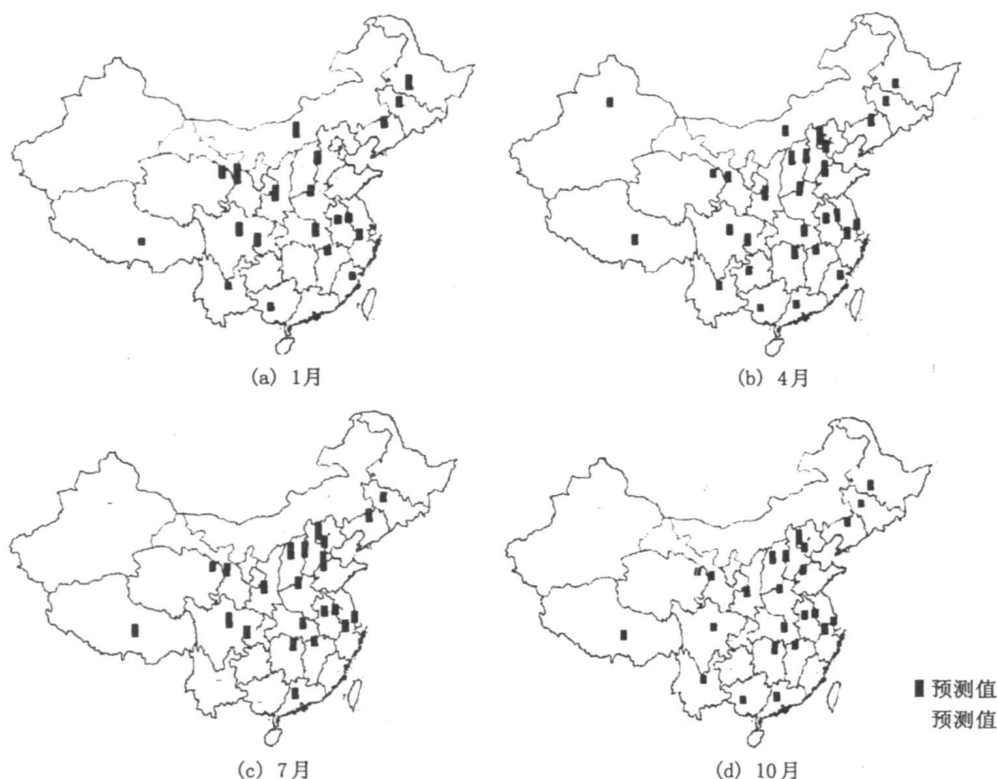


图2 中国31个省会城市月平均 PM_{10} 浓度的观测值与模拟预测值的比较

Fig.2 Observed and predicted monthly PM_{10} concentrations in capital cities in China

不能直接进行扬尘的计算,因此排放清单中也未纳入扬尘的排放,这是它低估的原因之一。另一地区为中国东北部的黑龙江、吉林、辽宁三省,该地区是重要的重工业地区,很可能由于排放清单中对工业排放的空间分布的计算误差,导致了 PM_{10} 的低估。中国北部的北京、天津、河北、山西、河南地区,1、7、10月份该地区模拟结果较为吻合,4月存在的一定程度的低估。这是由于这些地区在春季会有沙尘暴的发生,而沙尘排放不计算在颗粒物的排放清单中。

2.2 卫星遥感数据

为了克服地面观测的缺乏,本研究应用卫星遥感数据进行了模拟结果的评价包括 NO_2 柱浓度和气溶胶光学厚度(AOD)的数据。图3为OMI(Ozone Measurement Instrument)卫星所观测到的对流层 NO_2 柱浓度月平均值与CMAQ模拟值的比较。从结果来看,模拟值能够很好的反应 NO_2 的空间分布和时间变化。1月 NO_2 最高,其次是10月、4月和7月。 NO_2 浓度较高的地区主要集中在中国的三大城市群:京津冀、长江三角洲和珠江三

角洲地区。对其他污染地区,如河北省南部,山西太原,四川省东南部几个工业城市以及韩国和日本主要城市也能进行很好的再现。此外,从统计结果来看,1、4、7和10月模拟值和观测值的相关系数分别为0.86、0.80、0.81和0.88,其中偏差都很小(小于2%),表明模拟结果较为准确。从图中也可以看出污染最严重的1月和10月,模型高估了东部地区的浓度水平这可能是由于对采暖期 NO_2 排放量的估算具有很大的不确定性所致。

AOD为大气气溶胶光学厚度,可作为 $PM_{2.5}$ 的污染指标。在本研究中,AOD值来自美国国家航空航天局的MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)卫星数据。MODIS AOD数据在中国的应用研究非常活跃,Wang等人^[19]通过MODIS卫星数据和CSHNET地面数据的比较系统评价了MODIS数据的准确性,两者的相关系数为0.72。得到的主要结论为,中国中南部农业地区MODIS的准确度较高,中等准确度出现在温带森林地区、沿海地区、东北和中部的农业地区;而在北方干旱和半干旱地区,东北部偏远地区农田,青藏高原和南方森林地区准确度最差。Wang等人也发现,MODIS数据检索明显高估了北部干旱和半干旱地

区, 低估了东北部偏远地区农田和南部森林的浓度水平。

由图 4 可以看出, CMAQ 大体再现了 AOD 的分布特点。模拟准确度较高的地区有: 4、7 和 10 月的四川盆地, 1 月和 4 月的长江中下游地区, 如

湖北, 湖南, 安徽, 江西, 7 月份的北京、河北和山东地区。这与 Wang 等人的研究结果基本一致。2005 年 1 月, 中国的西北, 东北和中部和南部一些地区 CMAQ 模拟 AOD 值均高于 MODIS 观测 AOD 值。这可能是由于 1 月份中国北部和中部地区有

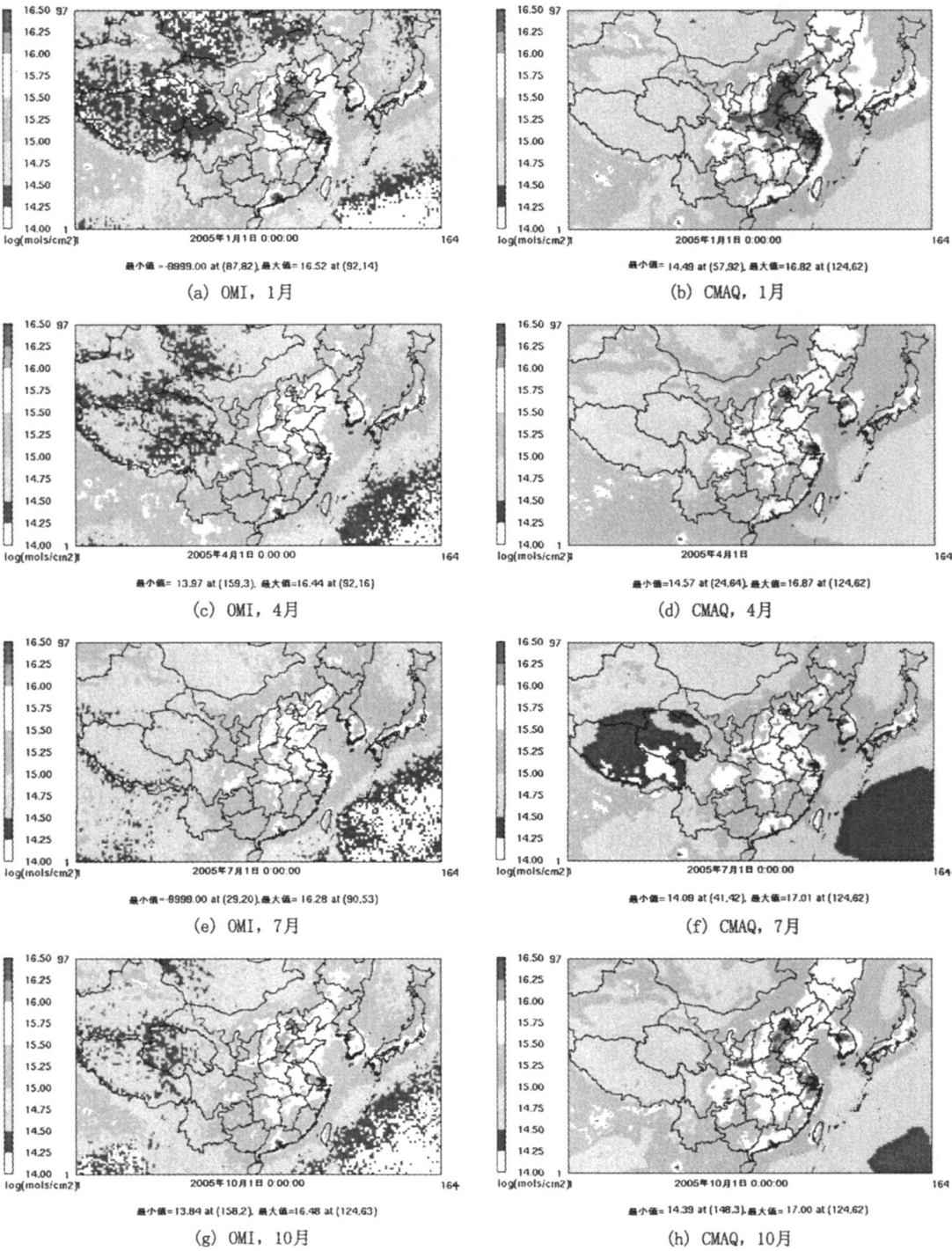


图3 NO₂柱浓度观测值 (OMI) 与CMAQ模拟值的比较

Fig. 3 Spatial distribution of monthly mean NO₂ column abundance derived from OMI and CMAQ

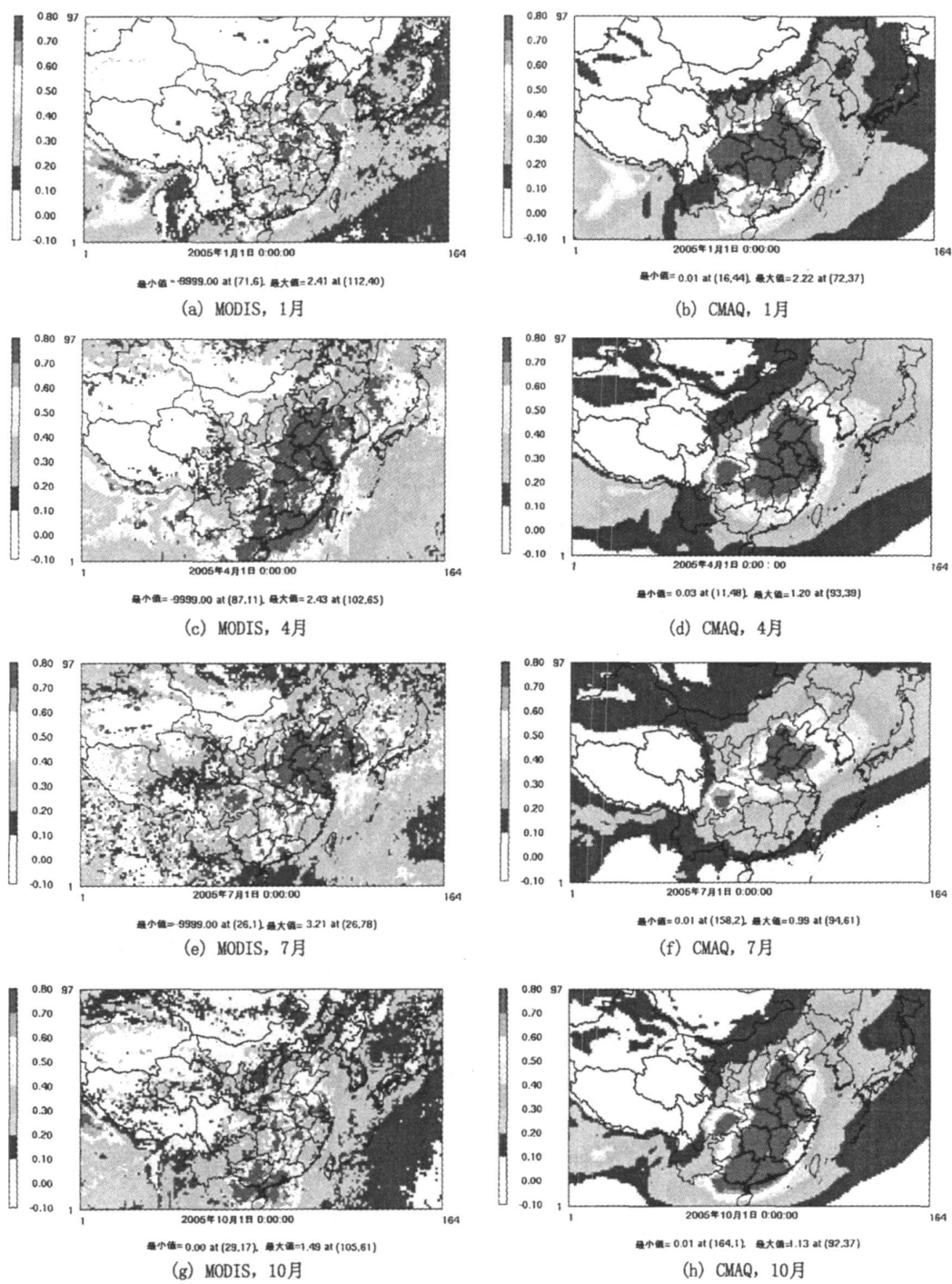


图4 MODIS 观测和 CMAQ模拟的AOD月平均值的比较
Fig.4 Spatial distribution of monthly-mean AODs derived from MODIS and CMAQ

剩余雪冰存在,影响了 AOD 的遥感,或是 MODIS 数据对南方森林地区的系统性低估。4 月,在中国西北和南部地区, CMAQ 模拟的 AOD 值普遍低于 MODIS 结果,这可能部分归因于扬尘的贡献,如前所述,本研究并未将其计算在内。7 月 CMAQ 的评估明显偏低。在 Kim 等人^[20] 研究中中国夏季的

AOD 观测值最高,可能的原因包括二次气溶胶形成、相对湿度增高、亲水性气溶胶吸湿增长、生物质燃烧的贡献等。因此, CMAQ 模拟值偏低的原因可能来源于生物质燃烧排放的不确定性和模型中颗粒物计算过程的不确定性。10 月 CMAQ 预测值比 MODIS 观测值高,特别是在中国东北、东部和南

部地区。这可能部分归因于中国东北部和南部地区的MODIS观测值的系统偏差。对整个模拟域的AODs统计分析表明, 1、4、7和10月模拟和观测的相关系数分别是0.70、0.64、0.67和0.72, 表明整体来说, CMAQ能对AODs进行很好的预测。

3 结论

1) MM5- CMAQ模拟系统能较好地模拟出SO₂、NO₂和PM等污染物的空间分布格局, 模拟结果与监测结果较吻合, 尤其是京津冀、长江三角洲和珠江三角洲地区。CMAQ模型能够较好的再现污染物的空间分布和时间变化。

2) 中国地区大气污染呈现出区域性的特征, 且在时空分布上东西部地区存在明显的差异。经济发达地区的污染更为严重。同时, MM5- CMAQ模拟系统对于区域大气污染物特征具有很好的模拟能力, 可以为区域大气污染控制服务。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. “十一五”国家环境保护标准规划[J].
- [2] ZHANG M, UNO I, YOSHI Y, et al. Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE- P and ACE- Asia campaigns[J]. *Atmospheric Environment*, 2004 (38): 6947- 6959.
- [3] ZHANG M. Modeling of organic carbon aerosol distributions over East Asia in the springtime [J]. *China Particuology*, 2004, 2(5): 192- 195.
- [4] ZHANG M. Numerical simulation with a comprehensive chemical transport model of nitrate, sulfate, and ammonium aerosol distributions over east asia[J]. *China Particuology*, 2005, 3(5): 255- 259.
- [5] ZHANG M, HAN Z, ZHU L. Simulation of atmospheric aerosols in East Asia using modeling system RAMS - CMAQ: Model evaluation [J]. *China Particuology*, 2007, 5(5): 321- 327.
- [6] CHEN D, CHENG S, LIU L, et al. An integrated MM5- CMAQ modeling approach for assessing trans- boundary PM10 contribution to the host city of 2008 Olympic summer games- Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(6): 1237- 1250.
- [7] CHENG S, CHEN D, LI J, et al. The assessment of emission- source contributions to air quality by using a coupled MM5- ARPS- CMAQ modeling system: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. *China. Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(11): 1601- 1616.
- [8] STREETS, D G, Fu J S, JANG C J, et al. Air quality during the 2008 Beijing Olympic games[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(3): 480- 492.
- [9] WANG L HAO, J He K, et al. A modeling study of coarse particulate matter pollution in Beijing: Regional source contributions and control implications for the 2008 Summer Olympics [J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 2008(58): 1057- 1069.
- [10] 李莉, 陈长虹, 黄海英. 应用Models- 3 CMAQ研究长三角区域大气污染及输送[J]. *上海环境科学*, 2007, (26) 4: 159- 165.
- [11] 冯业荣. 珠江三角洲气溶胶污染的机理分析及数值模拟研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.
- [12] BYUN D W, CHING, J K S. Science algorithms of the EPA Models - 3 Community Multi - scale Air Quality (CMAQ) modeling system[C]. US: EPA, 1999.
- [13] STREETS, D G, T C BOND, G R CARMICHAEL, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003 (21): 84- 93.
- [14] 史建武, 李树文. 大气地面污染带的模拟模型研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(1): 45- 49.
- [15] ZHANG Y. Probing into regional O₃ and PM Pollution in the U. S. , Part I: a 1- year CMAQ simulation and evaluation using surface and satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009(1): 12- 25.
- [16] 惠学香. 空气污染指数简易计算方法[J]. *环境监测管理与技术*, 2002, 14(1): 38- 39.
- [17] STREETS D G, FU J S, JANG C J, et al. Air quality during the 2008 Beijing Olympic games[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(3): 480- 492.
- [18] FU J S, STREETS, D G, JANG, C J, et al. Modeling regional urban ozone and particulate matter in Beijing, China [J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 2009(59): 37- 44.
- [19] WANG L, XIN J, WANG Y. et al. Evaluation of the MODIS aerosol optical depth retrieval over different ecosystems in China during EAST- AIRE [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(33): 7138- 7149.
- [20] KIM S, YOON S, KIM J, et al. Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi- year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/ sky radiometer measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(8): 1634- 1651.

(责任编辑 马立)