

应用 Models-3/CMAQ 模式对华北地区一次强沙尘天气的研究初探

王益柏 费建芳 黄小刚

(解放军理工大学气象学院,南京 211101)

提 要:根据 2002 年在 ACE-Asia 和 TRACE-P 试验中获得的亚洲区域污染源排放资料,结合由 MICAPS 能见度观测资料估算而得的颗粒物排放资料,利用美国 EPA 最新发展的 Models-3/CMAQ 模式系统,模拟研究了 2002 年 3 月华北地区发生的一次强沙尘暴个例。结果表明,(1)模拟的各气态污染物的时空演变及相互关系与已有的观测结果基本一致。(2)颗粒污染物的模拟结果也反映了已有的观测事实,粗细颗粒物呈一致的先降后升日变化趋势;沙尘过程前期,颗粒物污染主要来源于近地面污染源;沙尘期间,颗粒物污染主要源自外界沙尘的高空输送,且粗颗粒物污染是此次过程的首要颗粒污染。(3)该模式系统可用于沙尘气溶胶研究的进一步开发与利用。

关键词:沙尘天气 空气质量模式 气态污染物 颗粒物污染

A Preliminary Research on Application of Models-3/CMAQ Model to a Strong Dust in North China

Wang Yibai Fei Jianfang Huang Xiaogang

(Institute of Meteorology, PLA University of Sciences and Technology, Nanjing 211101)

Abstract: A strong sandstorm of North China in 2002 was simulated with the Models-3/CMAQ system newly developed by US EPA. The pollution source data were based on the ACE-Asia and TRACE-P Experiments in 2002, and the particulate emission data were estimated by the visibility range from MICAPS observations. The results show that, (1) the spatio-temporal evolvement and the mutual relationship of gaseous pollutants are consistent with the common regulation derived from observations. (2) The simulation of coarse PM also reflects the observational facts: The diurnal trend of both fine and coarse PM first falls and then raises; The PM source before

资助项目:中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室开放课题 2709;中国气象局上海台风研究所开放课题 2006STB02 联合资助

收稿日期:2008 年 5 月 29 日; 修稿日期:2009 年 4 月 3 日

SDS is near surface emission while the PM source after SDS becomes upper-air's transportation of dust; Pollution of coarse PM is dominant; (3) This air quality model system can be used for further development on dust aerosols.

Key Words: sandstorm air quality model gaseous pollutants particle pollution

引言

沙尘天气是我国北方地区的一种重要灾害性天气现象。沙尘天气不仅给工农业生产、人民生命财产带来严重的直接危害,而且伴随沙尘天气的飘尘及降尘会造成受影响地区空气质量严重恶化的间接危害,使人身健康受到损害。沙尘天气对城市空气质量的影响主要表现在气态污染物与颗粒污染物两个方面,其中气态污染物中的 SO_2 、 CO_x 、 NO_x 和 HC 等与 PM_{10} 颗粒物是影响范围较广、危害最大的污染源^[1]。

目前,许多学者对沙尘天气背景下城市污染物浓度的分布特征和变化规律进行了大量研究。徐晓峰等^[2]利用北京市环境监测中心提供的 PM_{10} 监测数据,对 2002 年 3 月北京地区一次强沙尘天气过程的空气污染状况进行了分析。方修琦等^[3]研究了沙尘天气过境前后北京市大气污染物质量浓度的变化情况。王英等^[4]分析了北京沙尘天气的整体污染变化过程。这些研究均是基于分析沙尘监测数据或空气污染指数等资料,而没有结合先进的数值模式。另一方面,利用数值模式研究区域及城市尺度大气污染问题的方法也取得了很大发展。Models-3/CMAQ 是美国环保署最新发展的第三代空气质量预报和评估系统,其可用于研究多尺度、多污染物(包括气态和固态污染物)的空气质量的预报、评估和决策等方面。卢艳等^[5]利用该模式系统模拟了长江中下游地区无降水条件下的空气质量状况。安兴琴等^[6]、王扬峰等^[7]分别利用该模式系统对兰州市和沈阳市冬季

采暖期(2002 年 12 月)的城市污染物浓度时空变化特征进行了分析研究。这些结果表明该模式系统对无降水气象条件下和复杂地形下的城市污染物的时空分布和变化规律都有较好的模拟能力。但是,至今尚无人利用该先进的空气质量模式开展沙尘天气对城市空气质量影响的数值模拟研究。

为此,本文选取 2002 年 3 月 18—22 日华北地区的一次强沙尘暴个例,应用 Models-3/CMAQ 模式系统开展沙尘天气过程的数值模拟研究,详细分析了此次强沙尘暴期间北京市大气污染物浓度(气态和颗粒污染物)的分布特征和变化规律,并与已有的监测分析进行比较,以检验该模式系统对沙尘天气的模拟能力,为将来进一步应用于沙尘天气的数值研究提供参考和借鉴。

1 沙尘天气概况及环流形势

1.1 沙尘天气概况

2002 年 3 月 18—21 日,受西伯利亚强冷空气东移南下影响,我国北方大部分地区及山东、河南、湖北、湖南西北部、四川东部等地的部分地区先后出现了大范围沙尘天气(图 1),其中内蒙古、甘肃中西部、宁夏北部、河北北部、北京、吉林西北部等地的部分地区出现了强沙尘暴,甘肃鼎新、内蒙古乌拉特后旗还曾一度出现能见度为零的特强沙尘暴^[8]。

此次沙尘暴过程的特点是:持续时间长,影响范围广,强度大且伴随明显大风和大幅降温。这是近几年来影响最为严重的强沙尘暴过程之一。甘肃、宁夏等地遭受了重大损

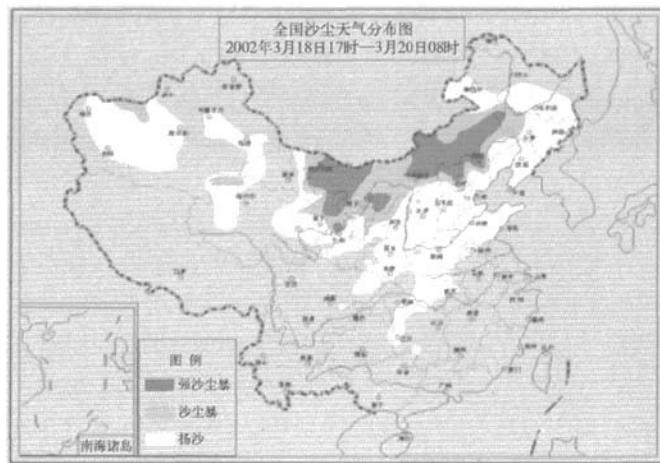


图 1 2002 年 3 月 18—21 日沙尘天气分布图(引自文献[9])

失,其中甘肃省沿沙漠沿线的农田受大风沙尘暴袭击,部分农田遭沙埋,部分塑料大棚遭大风沙尘暴袭击破坏,由于过程较强和能见度恶劣,对交通造成了一定的影响。沙尘暴使宁夏多处小麦麦种移位或沙埋,塑料大棚等农业设施严重受损,全区直接经济损失达 180 多万元。

1.2 环流形势概述

此次沙尘天气过程的发生发展主要是受强冷空气和蒙古气旋影响造成的^[10]。过程前期,欧亚中高纬 500hPa 环流形势为两脊两槽,欧洲平原与中西伯利亚到贝加尔湖为高压脊,冷空气在西西伯利亚堆积形成深厚的高空冷槽和强锋区,东亚地区为一浅槽。对应地面形势为:高压系统控制了中亚地区并不断加强东移,期间有蒙古气旋在蒙古北部产生并发展。至 19 日 20 时,蒙古气旋东移加强,内蒙古西部、甘肃、宁夏等地在冷锋东移南下过程中出现强沙尘暴天气。至 20 日 08 时,河套北部高空槽明显加深,槽前斜压性加强,强冷空气影响我国华北地区,对应地面形势发展为:蒙古气旋继续加深并停滞在蒙古国东部少动,与其配合的后部冷高压继

续东移南下,冷锋一路扫过华北地区、东北西南部、黄淮江淮等地,受上述系统的影响,华北等地出现近几年来最强的沙尘天气,北京北部遭遇强沙尘暴影响。

2 模式及参数设置

2.1 模式简介

Models-3 是美国环保局最新一代空气质量模式系统,其主要由中尺度模式 MM5、区域空气质量模式 CMAQ 和排放源处理模块 ECIP 三部分组成^[11]。MM5 是一个比较完善的中尺度动力学模式,为 CMAQ 提供连续的气象场及其他参数。ECIP 模块作为连接排放资料和 CMAQ 模式的桥梁,可以产生排放源小时浓度的三维数据供 CMAQ 使用。CMAQ 是模式系统的核心部分,可用于研究城市和区域尺度对流层臭氧、酸沉降、大气能见度、大气颗粒物及多种污染物的输送和转化过程。CMAQ 主要由如下几部分组成:ICON 和 BCON 分别为初始和边界值模块;JPROC 为光解速率常数模块;MCIP 为气象化学转换模块,为 CMAQ 提供模拟区域信息及气象资料等;CCTM 为化学反应机制处理

模块,是 CMAQ 的主体部分,其考虑了扩散和平流过程、云和气溶胶效应、气溶胶干湿沉降及模式流程分析等多物理过程。

2.2 参数设置

采用 MM5V3.7 提供气象场资料,模式初场取自 NCEP/NCAR 每日 4 次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,模式参数设置为:(1)单向两重嵌套区域:粗细网格分辨率分别为 45km 和 15km,格点数分别为:74×99、127×199,中心经纬度(40°N,108°E);(2)垂直方向取 σ 坐标,为不等距 23 层;(3)侧边界条件:粗网格区域为张弛边界条件,细网格区域为时变边界条件;(4)各种物理参数化方案:显式水汽方案均为简冰方案;积云对流参数化方案均采用 KF 方案;行星边界层方案均采用 Pleim-Xiu 方案;陆面模式采用 Pleim-Xiu LSM;上边界条件为 no upper atmospheric cooling。

CMAQ 所用污染源资料为网上公布的 2002 年在 ACE-Asia 和 TRACE-P 试验中获得的 $1^\circ \times 1^\circ$ 亚洲区域源排放资料。此资料包括点源和面源排放,面源又分为生物源和人为源。由于上述源排放资料中缺少颗粒物污染源(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$),故颗粒污染源通过 MICAPS 能见度观测资料估算得出, PM_{10} 采用王金艳和邵亚平总结的经验公式^[12]:

$$C = e^{(8.750249 - 0.580611D_v)} \quad D_v < 3.5 \text{ km}$$

$$C = 4589.802737D_v^{-1.35148}$$

$$20 \text{ km} \geq D_v \geq 3.5 \text{ km}$$

其中,C 代表 PM_{10} 浓度,单位 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, D_v 是能见度,单位 km。 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 采用杨复沫等^[13]对北京地区研究的结果,在春季取为 0.42。应用上述公式计算颗粒物源时,已摒弃雨、雾、薄雾及相对湿度大于 95% 的个例。CMAQ 采用两重嵌套区域,水平方向网格设置与 MM5 相同,垂直分为 13 层;采用 CB4 化学机制。

模拟时段为 2002 年 3 月 19 日 08 时至 22 日 08 时(北京时,下同),共计 72 小时,每小时输出一次模拟结果。本文主要从气态污染物(O_3 、 SO_2 、 NO_x)和颗粒污染物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)两个方面,将强沙尘暴期间(20 日 08 时至 21 日 08 时)北京地区的 PBL 层(1.00, 0.98, 0.96, 0.94, 0.92, 0.90, 0.85)模拟结果与已有监测结论进行比较,以检验模式系统对沙尘天气的模拟能力。

3 模拟结果分析

3.1 O_3 、 SO_2 与 NO_x 的日变化情况

图 2a 为 2002 年 3 月 20 日 08 时至 21 日 08 时气态污染物的变化曲线图。总体来看,二次污染物 O_3 的浓度比其他三种一次

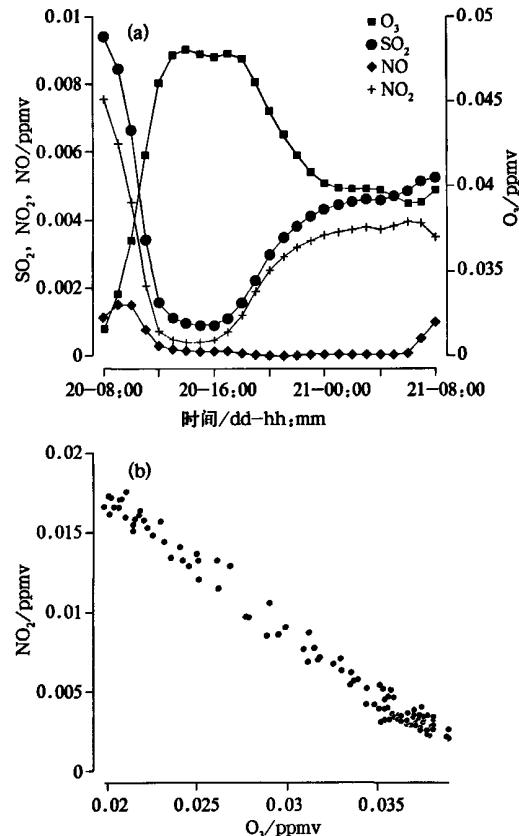
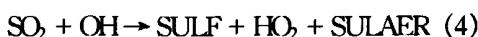
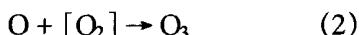
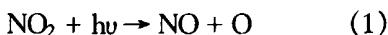


图 2 北京地区区域平均污染物浓度日变化(a)及 NO_2 与 O_3 区域相关散点图(b)

污染物浓度要大一个量级。 O_3 呈明显的单峰变化趋势,20日12时以前, O_3 浓度迅速攀升,峰值出现在20日13—18时(最大值约0.048ppmv,1ppmv=1×10⁻⁶),此后, O_3 浓度迅速降低,至21日凌晨07时达最小值。而三种一次污染物浓度的变化与此相反,为先降后升,其中以 SO_2 与 NO_2 表现最为明显。气态污染物的这种日变化可以由 CB_4 化学机制来解释。 CB_4 化学机制中考虑的相关物种的光化学反应主要有:



其中,SULF 为硫酸,SULAER 代表硫酸盐气溶胶。

由反应(1),(2)可知, NO_2 是 O_3 生成的重要前体物质。而 O_3 作为一种重要的氧化剂,参与诸多的氧化反应和光化学反应,包括将 NO 氧化成 NO_2 [反应(3)]。因此 NO_2 的高峰值往往对应于 O_3 的最低值,反之亦然。 O_3 与 NO_2 的这种一致的负相关关系在两者的相关图上有着很好的体现(图 2b)。这与王淑兰等^[14]分析北京市环境监测数据时得出的结论是一致的。反应(4)与(5)表明,一次物种 SO_2 主要参与硫酸及硫酸盐气溶胶的形成,该过程在湿度较大的条件下才会占据主导,而在沙尘过程的干环境下 SO_2 主要是受沙尘大风等有利扩散的影响。方修琦等^[3]、王英等^[4]将这种一次污染物的变化归纳为沙尘过程前的城市污染型(高气态污染物)、过程中的沙尘污染型(气态污染物浓度降低)及过程后的低污染型(维持较低浓度)。

3.2 O_3 、 SO_2 与 NO_x 的时空分布情况

图 3 是 Layer1 高度 O_3 浓度的水平变化

情况。由图分析,主要可以得到两个方面的结论:(1)从量级上来看,20日11时(图 3a) O_3 浓度极大值由0.048ppmv 增大至13时(图 3b)的0.050ppmv,且范围也有扩大,最低浓度也增至0.043ppmv,这是因为随着太阳辐射的不断加强,与之相关的局地光化学反应也不断加快所致;(2)从极值分布的变化来看,20日11时至20日13时,原位于北京西北部和西南侧的 O_3 浓度高值区向东南方有明显增强移动,这主要反映的是沙尘天气携带输送的影响。 O_3 浓度的这种时空演变与王淑兰等^[14]在分析北京市 O_3 污染的区域特征时指出的“ O_3 的形成是局地光化学过程和区域输送共同作用的结果”结论是一致的。

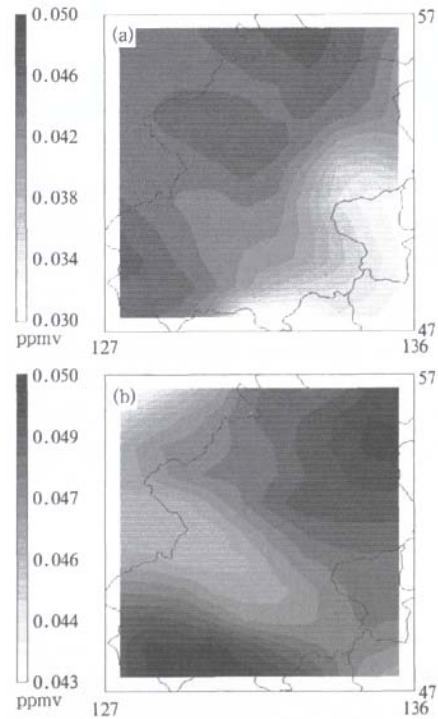


图 3 Layer1 的 O_3 浓度分布图(单位:ppmv)
(a)20 日 11 时;(b)20 日 13 时

图 4 为 Layer2($\sigma=0.98$)层上 SO_2 的水平分布,其揭示了 SO_2 浓度由南高北低向东南高西北低的转变过程。20 日 08 时(图 4a),北京地区南部存在一明显宽广的极 大域,至 20 日 11 时(图 4b),该极值区向东

南衰减、缩小,随后迅速移出北京上空。 NO_x 的分布情况与 SO_2 大致相似(图略),沙尘过程前,其浓度因局地聚集效应不断升高,过程后期在沙尘大风等有利扩散条件下高值区迅速东南移动衰减。徐晓峰等^[2]分析了此次过程北京地区污染物的浓度变化后指出,强沙尘天气时气态污染物(SO_2 、 NO_x 等)浓度会因大风等有利扩散条件而迅速降低。由此可知,模拟的一次污染物浓度变化也与已有的观测结论相一致。

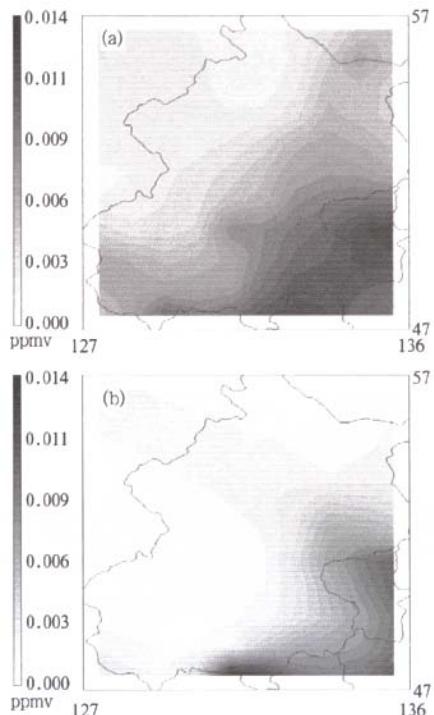


图4 Layer2 的 SO_2 浓度分布图(单位: ppmv)
(a)20 日 08 时;(b)20 日 11 时

图5是过北京市中心 O_3 浓度的南北纵向剖面。由图可知,沙尘过程前(图5a), O_3 呈准水平分布,上下分界明显,其浓度随高度增加,Layer7 上最高值达 0.058 ppmv;沙尘过程中(图5b), O_3 最高浓度降低至 0.047 ppmv,而前期的准水平分布也逐渐倾斜,北高南低的分布渐渐明显;沙尘过程后, O_3 浓度重现准水平分布。与此相反,三种一次污染物浓度随高度递减,北京南部明显高于北部,且沙尘期间其浓

度显著低于前期水平(图略)。它们的这种垂直结构和变化趋势也反映了前文分析的水平分布特点和时间演变趋势。

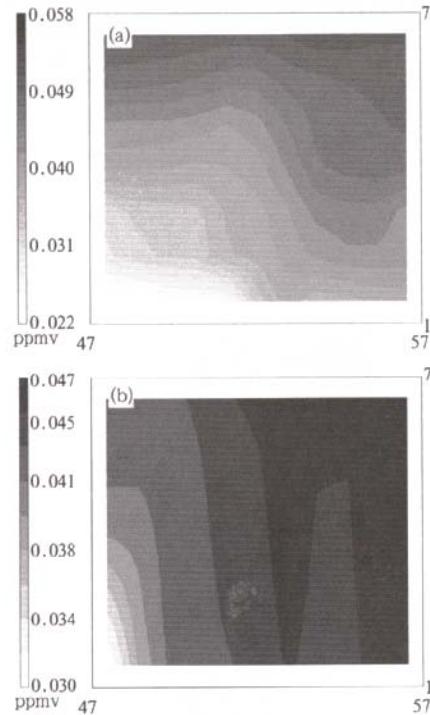


图5 过北京市中心 O_3 浓度的南北纵向剖面(单位: ppmv)
(a)20 日 08 时;(b)20 日 11 时

3.3 $\text{PM}_{2.5}$ 与粗颗粒物的模拟结果

PM_{10} (粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物)是一种危害极大的城市颗粒污染物。沙尘天气期间, PM_{10} 颗粒污染尤为严重。下文将利用已有观测结果对模拟的颗粒污染物作一比较分析,以进一步检验模式结果的有效性。

图6模拟的是 Layer1 上北京地区平均 $\text{PM}_{2.5}$ 及粗颗粒物浓度(粒径介于 $2.5\sim10\mu\text{m}$ 之间)日变化曲线,其中粗颗粒物(COARSE)主要由沙尘颗粒、脱离地表的土壤颗粒和海盐颗粒三部分组成。由图可知, $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒和粗颗粒均呈先降后升的日变化趋势:沙尘过程前期至 20 日 16 时,局地积聚的 PM_{10} (包括 $\text{PM}_{2.5}$ 和粗颗粒)浓度在沙尘大风的影响下迅速降至最低点,沙尘过程中,

受外界沙尘区域输送的影响,粗细颗粒物浓度迅速升高,并超过前期的最高水平,其中,粗颗粒物最高浓度达 $320 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,超过我国 PM_{10} 空气质量二级标准 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,造成了严重的颗粒物污染。沙尘影响后期,粗颗粒因沉降作用浓度不断减小,而 $\text{PM}_{2.5}$ 继续维

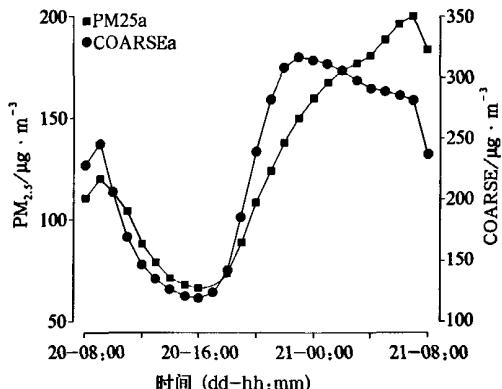


图 6 Layer1 层北京地区平均 $\text{PM}_{2.5}$ 及粗颗粒物浓度日变化(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

持高浓度。徐晓峰等^[2]利用北京市各站环境监测数据分析得出的结论也是如此,即沙尘来临前,各站 PM_{10} 浓度先小幅下降,随后其浓度迅速上升。由此可见,模式基本模拟出了 PM_{10} 浓度的变化趋势,存在的差异在于模拟结果相对于监测资料稍有延迟,这可能是模式模拟需要 spin-up 调整时间所致。此外,从量级上看,粗颗粒物在 PM_{10} 中占有大部分比例,其浓度远远超过了细颗粒 $\text{PM}_{2.5}$,表明此次沙尘过程中颗粒污染以粗颗粒物污染为主。这符合方修琦等^[3]和王英等^[4]总结的北京沙尘天气污染特点,也在一定程度上说明了模拟结果的正确性。

从垂直剖面图来看,颗粒物的分布特点是:沙尘过程前期,粗细颗粒物主要呈准水平分布,其高值区仅局限于近地面的薄层内(图 7a, 图 7c),表明该时期内颗粒物污染主

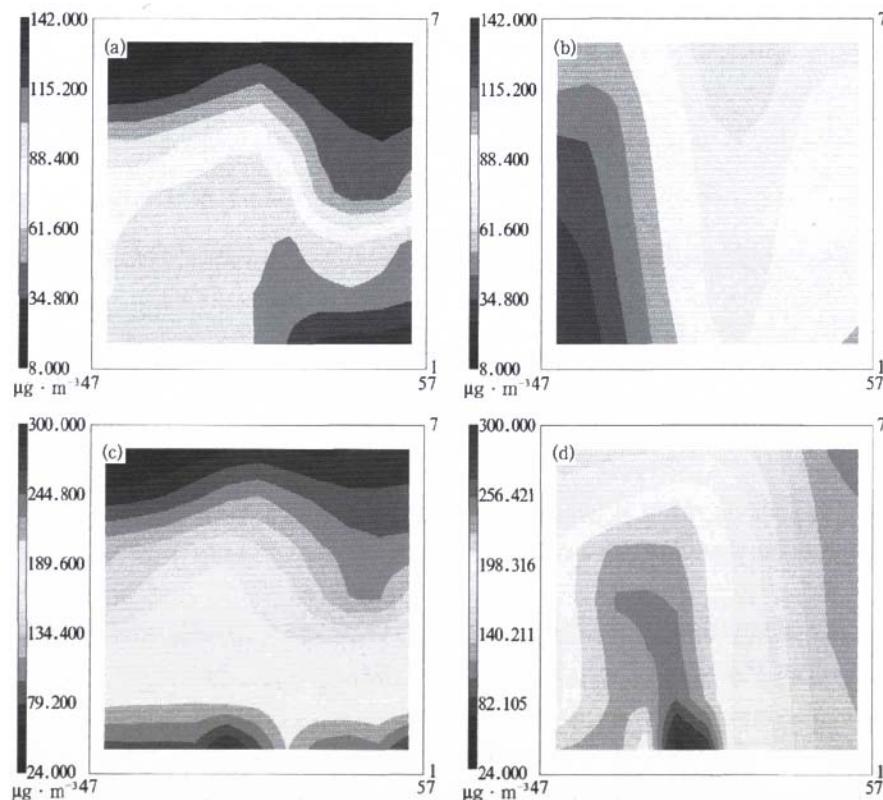


图 7 过北京市中心 $\text{PM}_{2.5}$ 及粗颗粒物南北向垂直剖面(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
 a) $\text{PM}_{2.5}$, 20 日 08 时; (b) $\text{PM}_{2.5}$, 20 日 11 时; (c) COARSE, 20 日 08 时; (d) COARSE, 20 日 11 时

要来源于近地面污染源;沙尘过程中,随着西北沙尘颗粒物的携带输送,粗细颗粒物浓度高值区向高空延伸,且粗颗粒物在城中自地面向高空形成一明显宽广的高值区,最高浓度达 $300\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 7b, 图 7d),这表明沙尘期间颗粒物污染主要源自外界沙尘的高空输送。这些结果都较好地验证了由已有监测数据得出的结论^[2,4]。

4 结论

本文将美国环保署发展的先进空气污染模式 (Models-3/CMAQ) 应用于沙尘天气的研究试验,通过与已有监测结果的比较分析,得出如下结论:

(1) 模拟的各气态污染物时空演变及相互关系与已有的观测结果基本一致: O_3 日变化和水平演变表明了“ O_3 的形成是局地光化学过程和沙尘区域携带输送共同作用的结果”;一次污染物 (SO_2 、 NO_x) 主要受沙尘大风影响浓度普遍偏低。

(2) 颗粒污染物的模拟结果也反映了已有的监测事实:粗细颗粒物呈一致的先降后升日变化趋势;沙尘过程前期,颗粒物污染主要来源于近地面污染源;沙尘期间,颗粒物污染主要源自外界沙尘的高空输送,且粗颗粒物污染是此次过程的首要颗粒污染。

(3) Models-3/CMAQ 模式不仅能模拟各气态污染物的物化过程,并具有对大气颗粒物的模拟预报能力,可用于沙尘气溶胶研究的进一步开发与利用。

当然,本文的工作还存在一些不足,比如排放源资料分辨率不高($1^\circ \times 1^\circ$),颗粒物浓度估算中没有考虑地域性差别,以及缺乏沙尘个例期间详尽的污染物浓度观测样本,这些均有待于改进和更细致的验证。

致谢: 卢艳在本文源排放处理及模式调试中给予了大量帮助,在此特致以衷心的感谢!

参考文献

- [1] 吴忠标. 大气环境和污染控制基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 3-4.
- [2] 徐晓峰, 张小玲, 李青春. 北京地区一次强沙尘天气过程的气象因子及空气污染状况分析 [J]. 气象科技, 2003, 31(6): 321-327.
- [3] 方修琦, 李令军, 谢云. 沙尘天气过境前后北京大气污染物质量浓度的变化 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2003, 39(3): 407-411.
- [4] 王英, 李令军. 北京沙尘天气污染分析 [J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 269-276.
- [5] 卢艳, 费建芳. 长江中下游地区空气质量的数值模拟研究 [J]. 安全与环境学报, 2005, 5(4): 78-82.
- [6] 安兴琴, 左洪超, 吕世华, 等. Models-3 空气质量模式对兰州市污染物输送的模拟 [J]. 高原气象, 2005, 24(5): 748-756.
- [7] 王扬峰, 左洪超, 马雁军, 等. 应用 Models-3 模式系统对沈阳市空气质量的数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(3): 487-493.
- [8] 乔林, 薛建军. 北方出现强沙尘暴, 南方阴雨天气多 [J]. 气象, 2002, 28(6): 58-61.
- [9] 中国气象局, 2002 年 3 月 18—21 日沙尘暴天气概况 [OL]. 沙尘天气年鉴(中国沙尘暴网), <http://www.duststorm.com.cn>.
- [10] 薛建军, 刘月巍, 牛若芸, 等. 2002 年 3 月 18—22 日强沙尘暴过程分析 [J]. 气象, 2004, 30(9): 39-44.
- [11] Byun D W, Ching J K S. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-Scale Air Quality (CMAQ) Model System [R]. EPA/600/R-99/030, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. 1999: 1-1~1-17.
- [12] 王金艳. 沙尘模式优化与东亚沙尘天气量化分级研究 [D]. 兰州大学博士生研究论文, 2006.
- [13] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化特征及其与 PM_{10} 、TSP 的关系 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 506-510.
- [14] 王淑兰, 柴发合. 北京市 O_3 污染的区域特征分析 [J]. 地理科学, 2002, 22(3): 360-364.