

刘香娥,何晖,贾星灿,等. 2016. 北京一次污染天气过程特征的数值模拟. 气象, 42(9):1096-1104.

北京一次污染天气过程特征的数值模拟^{*}

刘香娥^{1,2,3} 何 晖^{1,2,3} 贾星灿^{1,2,3} 高 茜^{1,2,3}

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

3 云降水物理研究与云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

提 要: 运用耦合了化学模块的中尺度数值模式 WRF/Chem 和自 NCAR 引进的人类污染物排放源数据对北京地区 2012 年 8 月 31 日污染天气过程的特征进行了数值模拟, 结果表明模拟的臭氧(O_3)浓度具有明显的日变化特征, 高、低峰值分别出现在午后和夜间, 空间分布与流场有一定关系; $PM_{2.5}$ 也存在日变化, 但空间分布相对稳定, 高值主要聚集在城区; 局地污染物具有水平输送特征, 但因总量为零, 并未加重污染物的局地聚集; 来自北京南部的远距离输送是这次污染物的主要来源之一。敏感性试验分析发现, 这次过程的 O_3 污染主要来源于北京之外的外源输送, 而细颗粒物主要来源于本地生成; O_3 污染对前体物(NO_x)的敏感性比较平稳, 对挥发性有机物的敏感性起伏较大, 凌晨至上午最为明显。

关键词: 污染, WRF/Chem, 数值模拟

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.007

Numerical Simulation of a Pollution Event in Beijing

LIU Xiang'e^{1,2,3} HE Hui^{1,2,3} JIA Xingcan^{1,2,3} GAO Qian^{1,2,3}

1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 Key Laboratory of Beijing for Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089

Abstract: The WRF/Chem model coupled with anthropogenic atmospheric pollution emission data from NCAR is used to simulate characteristics of one pollution event in Beijing on 31 August 2012. The results show that ozone (O_3) concentrations have obvious diurnal variation characteristics. The high and low peaks appear in the afternoon and night respectively. The spatial distribution and flow field are related. $PM_{2.5}$ also has the diurnal variation, but the spatial distribution is relatively stable and mainly in urban areas. Local pollutants have horizontal transport characteristics but the total amount is about zero, and it has not increased the local accumulation of pollutants. Long distance transportation from southern Beijing is one of the main sources of the pollutant. Sensitivity test analysis shows that the O_3 pollution of the process is mainly from Beijing, and the fine particles are mainly generated locally. The sensitivity of O_3 pollution to the nitrogen oxide (NO_x) is relatively stable, but varies greatly to volatile organic compounds, especially from wee hours to morning.

Key words: pollution, WRF/Chem, numerical simulation

^{*} 国家科技支撑项目(2014BAC16B04)、北京市自然科学基金资助项目(6154027 和 8144049)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306065)和国家自然科学基金项目(41675138, 41375136 和 41505119)共同资助

2015 年 8 月 5 日收稿; 2016 年 8 月 4 日收修定稿

第一作者: 刘香娥, 主要从事云降水物理和大气化学研究. Email: lxe3399@163.com

引言

20世纪80年代以来,随着经济发展和城市化进程的加速,我国大部分地区空气污染现象日趋严重,灰霾天变得越来越多,这使得臭氧(O_3)和以 $PM_{2.5}$ 为代表的细粒子污染物渐渐发展为空气污染的首要大敌。北京作为首都,其环境问题也日益受到广泛关注,近年来开展了诸多相关科学的研究。研究成果多涉及北京市空气污染特征、污染源来源及贡献和空气污染气象条件分析等方面。如于淑秋等(2002)分析了北京市区的大气污染时空分布特征,指出可吸入颗粒物和二氧化硫(SO_2)等煤烟型污染物是首要的治理目标;任阵海等(2004)分析了北京地区大气污染特征及输送通道,指出北京大气环境质量与周边地区的污染源有密切联系。郭虎等(2007)、徐晓峰等(2005)针对北京出现的具体污染天气过程进行了大尺度、局地、沙尘、静稳等气象条件分析;徐敬等(2007;2009)、王雪松等(2009)及何心河等(2016)研究了北京 $PM_{2.5}$ 、 O_3 等污染物的来源和成分解析;来自北京南部直接输送的 O_3 对局地污染有重要贡献;孙扬等(2006a;2006b)、陈鹏飞等(2012a;2012b)和花丛等(2016)对北京污染天气化学组分的时空分布及来源进行了总结。上述对北京地区污染天气进行的多方面、多尺度深入研究可以为空气质量数值预报、政府部门制定环境控制策略提供一定的理论基础。

为深入研究北京空气污染的特征,本文将运用

WRF/Chem数值模式工具对一次典型的污染过程进行数值模拟,将模拟的污染物与观测值进行对比验证,再进一步对污染物的分布特征进行分析,并设计了敏感性试验,模拟无城区排放源输入下的城区污染状况,并对 O_3 对前体物的敏感性进行分析。

1 个例概况和天气背景分析

1.1 个例概况

2012年8月30—31日,北京出现了严重雾-霾天气,全市各监控点的空气污染指数均达到中度污染以上,部分地区还达到了重度污染。北京市环境保护监测中心的数据显示,从30日傍晚开始,北京各地区可吸入颗粒物浓度迅速上升,包括密云水库在内的大部分监测站,短时内都达到 $200\mu g\cdot m^{-3}$ 以上,有的监测站甚至超过了 $300\mu g\cdot m^{-3}$ 。高浓度污染一直持续到31日下午。此次污染范围覆盖北京市全境,多地能见度不到400m,空气湿度较大,严重影响了公众的出行和生活。

1.2 天气背景分析

张小曳等(2013)曾指出持续性雾-霾天气的气象条件与前期最大的不同是中纬度地区径向型环流较弱,没有明显的冷空气,南方暖湿气流相对增强,中东部地区处于弱的均压区。因此,分析雾-霾过程的气象条件对于理解其成因十分必要(高怡等,2014)。图1为2012年8月30日08时(北京时,下

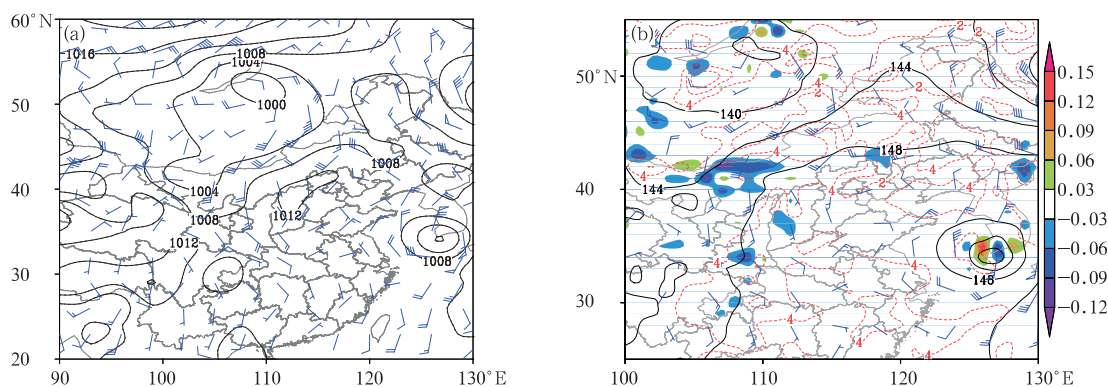


图1 2012年8月30日08时地面图(a;等高线:黑实线,单位:dagpm)和850 hPa天气图

(b;等温线:红虚线,单位:°C;垂直速度:阴影,单位: $m\cdot s^{-1}$)

Fig. 1 Surface (a) and 850 hPa (b) isobaric charts at 08:00 BT 30 August 2012

[Black solid lines represent geopotential height (unit: dagpm), red dashed lines represent isotherm (unit: °C), shaded areas show vertical velocity (unit: $m\cdot s^{-1}$)]

同)的地面天气图,可以看到在污染天气出现之前,华北地区位于弱的暖高压控制之下,研究表明这种天气形势是不利于华北地区空气污染物扩散的天气形势之一(孙韧等,2005),地面水平风速不大;850 hPa 图上则显示北京地区上升气流很小,925 与 850 hPa 高度层之间有逆温层存在,在这种天气形式之下,北京地区天气晴朗,卫星云图上显示基本无云(图略),光照充足。这种典型的“静稳”天气非常有利于污染天气的出现和维持。这两天大量中高云系控制北京地区上空,空气流动性差,扩散不出的污染物和雾气混合在一起,是形成稳定雾-霾天气的主要原因。

2 数值模拟

2.1 数值试验

文中采用耦合了化学模块的中尺度数值模式 WRF/Chem(Grell et al, 2005)对个例进行模拟。该模式由美国国家海洋大气局(NOAA)、国家环境预报中心(NCEP)、国家大气研究中心(NCAR)等机构联合开发,可用于研究化学污染气体和气溶胶的排放、湍流混合、传输和转化、气溶胶直接间接效应及干湿沉降等过程。WRF/Chem 的气象场由 WRF 模式提供,空气质量部分采用与气象部分完全相同的传输方案、格点和时间分辨率以及物理方案,其中的气象因子变化能及时地影响化学过程,化学过程也能立刻对气象过程做出反馈,实现了气象模式与化学传输模式在时间和空间上的紧密耦合(贾星灿等,2012)。

文中对个例的模拟,采用自 NCAR 引进并经过北京本地化处理的人类污染物排放源数据作为初始污染物输入 WRF/Chem 模式(He et al, 2015),该排放源数据以北京为中心,水平格距 10 km,格点数为 100×100 ,覆盖了华北的大部分地区。模式的模拟采用了 Lin 等(1983)微物理方案和 RADM2(Regional Acid Deposition Model)气相化学方案,开启云方案和气溶胶-云-辐射的相互作用,采用 Fast-J 光化学方案。模拟起始时间为北京时间 8 月 27 日 00 时,一共积分 144 h,其他参数设置如表 1 所示。

2.2 结果验证

由于缺乏相关的空间观测数据,图 2 给出了宝

联和朝阳单站 O_3 、氮氧化物(NO_x)污染物的模拟结果和实际观测的时间演变对比图。在图 2a 和 2c 可以看到,两站观测的 O_3 浓度在 30 日上午呈明显的上升趋势,午后达到浓度的最大值,之后开始减弱,夜间至凌晨浓度降到最低,31 日也有同样的变化趋势, O_3 浓度呈现出显著的日变化特征。模式模拟的 O_3 浓度也有相同的时间演变趋势和日变化特征,只是模拟的浓度峰值大小和出现的时间与实际观测相比有些许差异,这与参数设置和模式模拟的误差有关。图 2b 显示,模拟的 NO 浓度值在初始的 6 h 内比观测值偏小,但变化趋势一致,此后浓度的大小和随时间演变趋势与实际观测很接近,模拟效果较好。 NO_2 的模拟,则在初期效果较好。图 3 给出的是观测与模拟 30 日 08 时 10 m 风场的对比,可以看到模拟区域的环流状况与 NCEP 资料比较接近,北京及周边地区的风力都不大。总体而言,WRF/Chem 模式对此次污染过程的模拟效果比较可信,可以用模拟结果对这次污染过程进行进一步的分析。

表 1 数值试验中参数设置

Table 1 The model parameters setting

方案名称	方案选择
微物理方案	Lin-Scheme
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Goddard
边界层方案	QNSE-TKE
水平对流方案	Positive-Define Advection
气相化学方案	RADM2
光化学方案	Fast-J
云化学方案	On
气溶胶-云-辐射相互作用	On
积云对流参数化方案	New Grell Scheme

3 结果分析

3.1 污染物时间-空间分布特征

图 4 给出模拟的 O_3 浓度分布图,可以看到,在 31 日 08 时,北京整个地区的 O_3 浓度都相对较低,基本都处于 30 ppb(浓度单位:1 ppb = 10^{-9})以下,地面风场以东风为主,在西部山区有风场辐合,对应有小范围的 O_3 聚集,浓度比平原地区略高;至 12 时, O_3 浓度显著升高,整个北京城区甚至大部分模拟区域都被高浓度的 O_3 覆盖,浓度高达 80 ppb 以上,此时的地面风场以东南风为主,与 08 时相同,在风场辐合的区域(如北京的正南和北京城区的西部)对应有明显的高浓度 O_3 聚集。午后 O_3 浓度偏

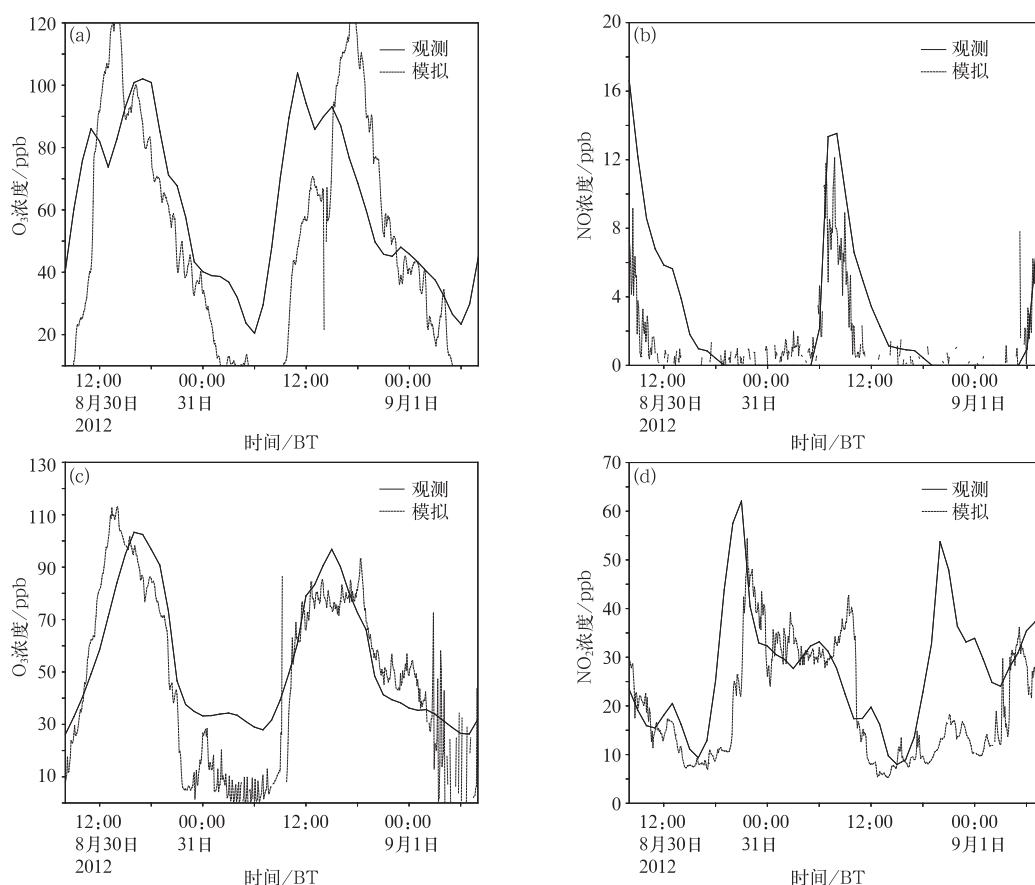


图2 2012年8月30日至9月1日宝联(a, b)、朝阳(c, d)两站 O_3 (a, c) 和 NO_x (b, d) 的观测(实线)与模拟(点线)浓度时间序列对比图

Fig. 2 The time series of observed (solid line) and simulated (dotted line) O_3 (a, c) and NO_x (b, d) concentration at Baolian (a, b) and Chaoyang (c, d) Stations from 30 August to 1 September 2012

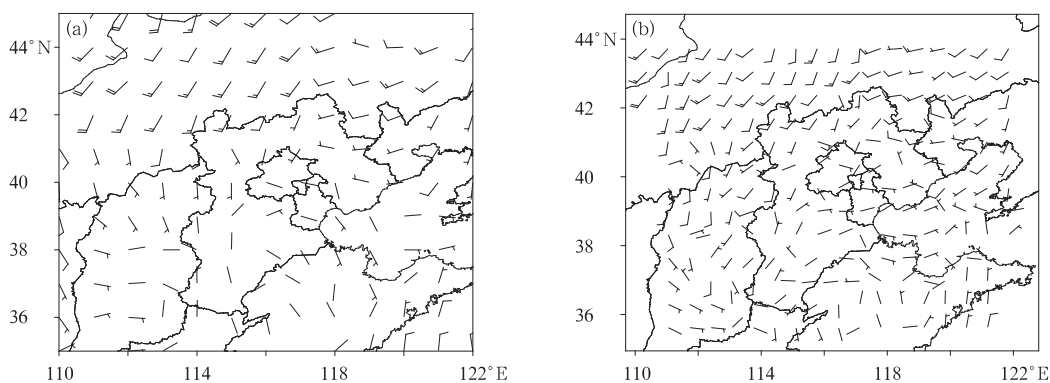


图3 2012年8月30日08时 NCEP(a)和模拟(b)的10 m 风场图

Fig. 3 The 10 m wind fields of NCEP (a) and simulation (b) at 08:00 BT 30 August 2012

高与陈鹏飞等(2012a)统计的结果相符。9月1日02时, O_3 的浓度有所下降, 高浓度分布区随气流移至北京以西以北地区。分析原因可以发现, 由于北京属于典型的“簸箕”状地形(西部和北部为山脉, 东南部为平原), 当中低空吹偏南风或者偏东风的时候,

污染物在风的输送作用下很容易在山前平原地区汇聚, 而午后出现浓度的高值则与12时出现最大太阳辐射和14时出现地面最高温度有一定关系(陈鹏飞等, 2012b; 高怡等, 2010)。模拟的 O_3 浓度日变化特征与很多其他观测结果都比较一致(徐敬等, 2009)。

图 5 给出的是 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度分布。可以看到, 在 31 日 08 时北京城区内的污染较重, 尤其是图中三个观测站点附近, 污染物浓度高达 $700 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。12 时和 9 月 1 日 02 时, 城区的污染仍然维持, 只是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所降低, 受气流的影响城北的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所增强。

污染物除了水平分布不均, 在垂直高度上也有一定的差异。图 6 给出的是昌平单站 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的时间-高度分布图。图中显示, 在垂直方向上的低空, O_3 主要分布于 2.5 km 以下, 并且高浓度区的分布与低空垂直运动的活跃区相关联; 而 $\text{PM}_{2.5}$ 主要分布于 1.5 km 以下。值得注意的是, 在 3~5 km 的高度区内, 有一明显的 O_3 稳定分布带, 这与很多

观测模拟资料一致。分析原因表明, 白天太阳辐射加热了下垫面和低空大气, 形成对流混合层及层顶附近的逆温层, 对流混合把低空的水汽和污染物向上输送, 但受逆温层的阻挡, 上升的气团在逆温层附近扩散减弱。此外对 O_3 而言, 存在平流层的向下输送, 而逆温层顶附近可能受光化学反应的影响, O_3 高浓度区的向上延展比 $\text{PM}_{2.5}$ 要高一些, 因此在 3~5 km 的高度区内存在相对稳定的 O_3 分布带。

从以上两种污染物的时间空间分布来看, O_3 的日变化特征非常明显, 空间内浓度高值的分布与地面流场和垂直的湍流混合有一定关系。 $\text{PM}_{2.5}$ 也存在日变化特征, 但在空间分布上, 模拟区域内的北京城区为显著的高值中心, 这与人类活动密不可分。

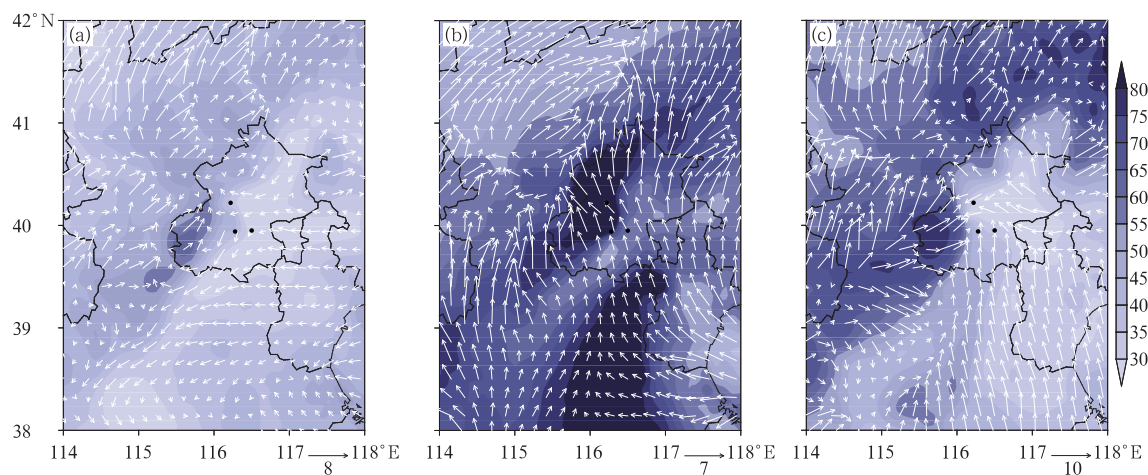


图 4 2012 年 8 月 31 日 08 时(a)、12 时(b)和 9 月 1 日 02 时(c)的 O_3 浓度(单位: ppb)分布

Fig. 4 Spatio-temporal distribution of O_3 concentration at 08:00 BT (a), 12:00 BT (b) 31 August and 02:00 BT (c) 1 September 2012 (unit: ppb)

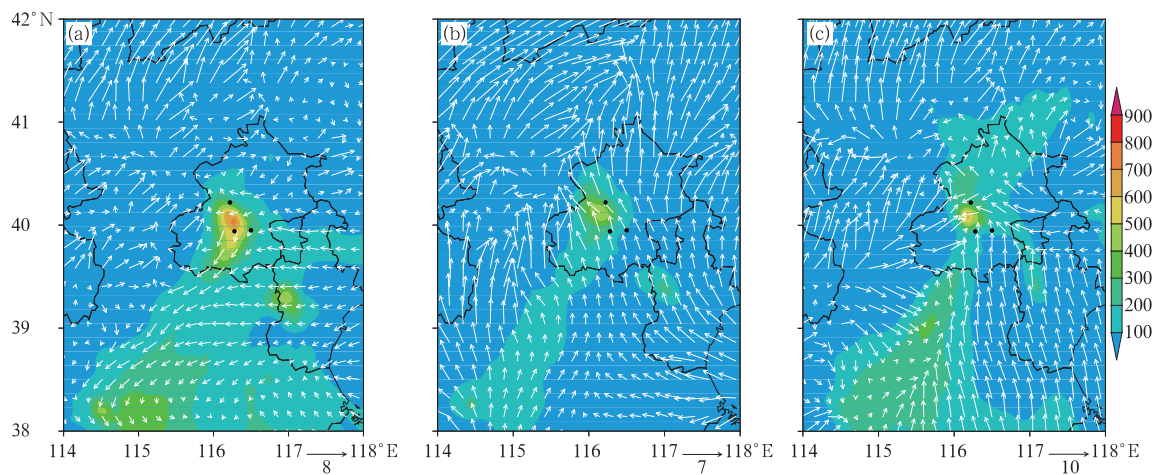


图 5 同图 4, 但为 $\text{PM}_{2.5}$ (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for $\text{PM}_{2.5}$ (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

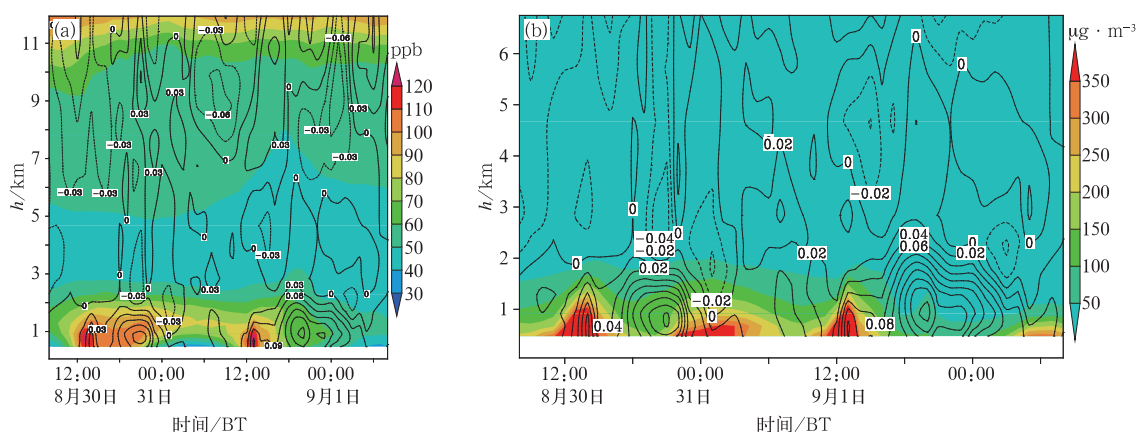


图 6 2012 年 8 月 30 日至 9 月 1 日昌平站 O_3 (a) 和 $PM_{2.5}$ (b) 时间-高度分布

(浓度: 彩色; 垂直速度: 等值线, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 6 Time-height distribution of O_3 (a) and $PM_{2.5}$ (b) at Changping Station from 30 August to 1 September 2012

(concentration: shaded area; vertical velocity: contours, unit: $m \cdot s^{-1}$)

3.2 污染物传输特征分析

为了计算污染物的水平传输特征, 参照文献 (Jiang et al, 2008) 的做法分别计算宝联、昌平和朝阳三个站点东、南、西、北四个方向上邻近格点对该站点 O_3 和 $PM_{2.5}$ 浓度的水平输送贡献, 采用水平传输通量来表征。图 7 是宝联站的情况, 可以看到该站点来自西向和南向的 O_3 水平输送通量均为正值, 而北向和东向的输送通量为负, 总的输送净值虽然有小许波动, 但基本为 0; $PM_{2.5}$ 来自四个方向上的输送有类似的表现, 但因北向负的输送偏大, 因此总的输送净值以负值为主。昌平和朝阳两个站点这

两种物质的水平输送与宝联站类似(图略)。由此可见, 局地污染物虽然具有明显的水平输送特征, 但由于净传输通量为负或基本为 0, 表明在污染事件发生后, 污染物的局地水平输送并未加深城区污染物的聚集。图 8 给出宝联、昌平和朝阳三个站点, 高度分别为 0.5、1.0 和 1.5 km 的自 9 月 1 日 00 时开始的污染物 NCEP 后向轨迹分布图, 可以看到, 在 1.0 和 1.5 km 高度上污染物主要来自 400 km 之外的南部地区, 0.5 km 高度处的污染物来自南部 300 km 附近。北京地区的污染物都有来自南部的长距离输送, 因此对北京污染天气的出现有不可忽视的作用。

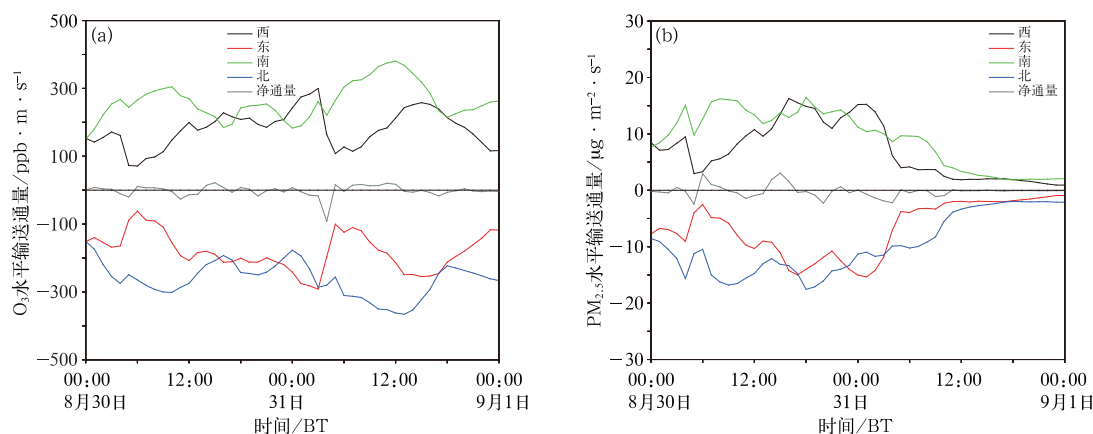


图 7 2012 年 8 月 30 日至 9 月 1 日宝联站 O_3 (a) 和 $PM_{2.5}$ (b) 的水平输送通量随时间的演变

Fig. 7 Temporal variation of horizontal transport flux of O_3 (a) and $PM_{2.5}$ (b)

at Baolian Station from 30 August to 1 September 2012

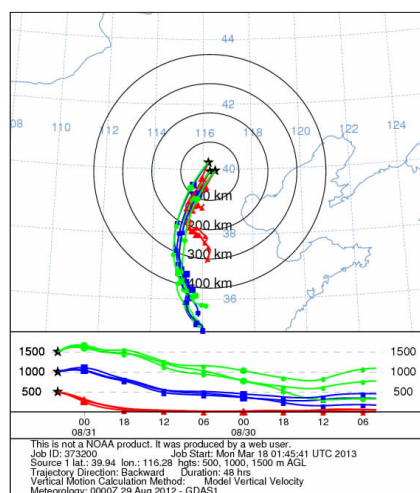


图 8 污染物后向轨迹示意图

Fig. 8 Trajectory diagram of pollutants

3.3 敏感性试验

为了评估外部输送和区域排放对本次污染过程的影响,文中设计了一组敏感性试验,即把北京地区的初始输入排放源关掉,将模拟结果与控制试验进

行比较。图 9 给出城区宝联站 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两种污染物的试验对比结果,可以看到初始源对模拟 O_3 浓度的影响不大,在整个模拟时段里,敏感试验和控制试验的 O_3 浓度有相同的日变化特征,最高值都出现在 30 日和 31 日的午后(约 100 和 90 ppb),最低值都出现在清晨(20 ppb 左右),两者浓度的变化随时间的演变基本一致。有研究表明,对一个地区 O_3 的贡献有两种方式,一种是直接向该地区输入 O_3 ,称为直接 O_3 贡献,另一种是输入 O_3 前体物 [NO_x 和挥发性有机物(VOCs)]参与本地区的光化学反应而生成 O_3 ,称为 O_3 前体物贡献(王雪松等, 2009),文中的 O_3 敏感试验结果表明,本次污染过程中 O_3 浓度的高值与本地源排放关系不大,但究竟是外源地区的直接 O_3 贡献还是 O_3 前体物的贡献还需要进行进一步分析。 $PM_{2.5}$ 的试验结果与 O_3 有很大差异,在没有初始排放源输入的情况下模拟出的宝联站 $PM_{2.5}$ 浓度显著减小,平均值约为 $100 \mu g \cdot m^{-3}$,与控制试验的最高浓度(约 $900 \mu g \cdot m^{-3}$)相比降低了约 88%。这表明细颗粒物污染主要来源于本地的生成,这与人类活动有很大关系。

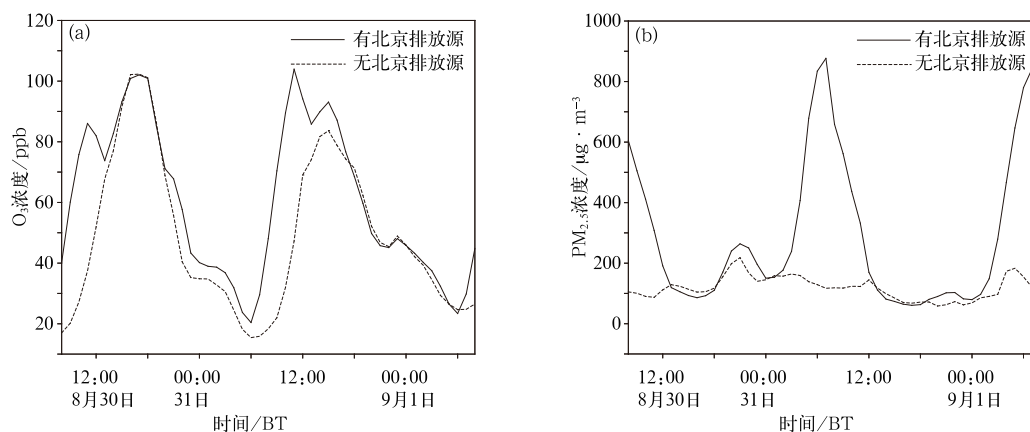


图 9 2012 年 8 月 30 日至 9 月 1 日宝联站有(实线)、无(点线)北京排放

源输入时模拟的 O_3 (a) 和 $PM_{2.5}$ (b) 浓度随时间的演变

Fig. 9 Temporal variation of O_3 and $PM_{2.5}$ concentration at Baolian Stations with all emissions (solid line) and without Beijing emission (dotted line) from 30 August to 1 September 2012

由于 O_3 是 NO_x 和 VOCs 在大气中通过一系列光化学反应形成的二次污染物(唐孝炎等,1990),其浓度水平对前体物排放变化具有非线性的化学响应特性(NARSTOST,2000)。因此,文中又设计了一组针对 O_3 前体物的敏感性试验,即将初始排放源中两种前体物浓度分别增加一倍,其他试验条件不变,用控制试验与两个敏感试验模拟的 O_3 浓度差

与控制试验的 O_3 浓度之比来表示该类源的贡献量。表 2 是敏感性试验设计,图 10 给出的是宝联站的试验结果。由图可见,在 CASE1 中,当排放源的 NO_x 浓度增加一倍时,无论是白天还是晚上模拟产生的 O_3 浓度降低(20%~50%)得都比较平稳,这表明 O_3 污染对 NO_x 浓度的增加的敏感性不是非常显著;而当排放源中 VOCs 浓度增加一倍时,模拟

产生的 O_3 浓度变化起伏较大,在控制试验 O_3 浓度较高的白天,CASE2 的 O_3 浓度增加 20% 左右,而在凌晨至上午,CASE2 模拟的 O_3 浓度比控制试验增加一倍多,表明在该时段臭氧生成对前体物 VOCs 的敏感性比较显著。分析原因可能是,北京城近郊区排放的碳氢化合物绝大部分来自人为源(王雪松等,2002),在凌晨至上午这个时段,人类活动还未开始,前体物的缺乏抑制了 O_3 的生成,当 VOCs 增加时,NO 与 VOCs 反应,NO 浓度降低,NO 对 O_3 的滴定作用减小,导致 O_3 浓度增加;值得注意的是,因夜间 O_3 的浓度非常低,城市地区接近于 0,尽管 CASE2 与控制试验 O_3 浓度之差与控制试验的比值翻倍,但实际上绝对浓度的变化并不大。

表 2 敏感试验设计
Table 2 Sensitive test design

	排放源组成		
	气溶胶	NO_x	VOCs
控制试验(CRT)	原数据	原数据	原数据
CASE1	原数据	扩大一倍	原数据
CASE2	原数据	原数据	扩大一倍

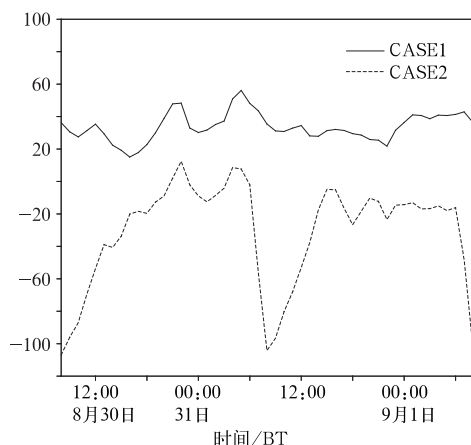


图 10 敏感与控制试验模拟的 O_3 浓度差与控制试验的 O_3 浓度之比随时间的演变(单位: %)

Fig. 10 Temporal variation of the ratio of O_3 concentration difference between the sensitive test and the control experiment (unit: %)

4 结论和讨论

文中运用耦合了化学模块的中尺度数值模式 WRF/Chem 对北京的一次污染过程特征进行了模

拟分析,主要得到以下结论:

微风、逆温的“静稳”天气和晴朗、光照充足的日间气象条件是这次污染过程主要的天气原因。模式模拟的 O_3 浓度与观测相比比较一致,具有明显的日变化特征,高、低峰值分别出现在午后和夜间,空间分布与流场有一定关系; $PM_{2.5}$ 也有一定的日变化特征,但空间分布相对比较稳定,高浓度污染主要聚集在城区;这两种污染物都具有水平输送的特征,但由于在污染时段里的净输送基本为 0 或总体为负,因此对城区污染的加剧贡献不大;来自北京南部的远距离输送可能是这次污染物的主要来源。对 O_3 的直接输送还是前体物输送还有待进一步的分析研究。

设置了针对北京地区污染源有无的敏感性试验,分析模拟的污染物状况发现,本次过程的 O_3 污染与北京之外的外源输送关系很大,而细颗粒物主要来源于本地生成; O_3 污染对 NO_x 前体物的敏感性比较平稳,而对 VOCs 的敏感性起伏较大,凌晨至上午最为明显。

发生雾-霾天气的主要影响因素是污染排放和气象条件两方面,并且雾-霾天气一旦产生,影响范围都比较广,因此为有效应对雾-霾天气并达到最佳治理效果应当进行区域联合控制和预防,应调整产业结构、加强环境治理等,从源头上减少污染物的排放。同时应充分利用大气的自净能力,在具备人工影响天气作业条件时,可以适时开展人工影响天气增雨(雪)作业,利用湿沉降改善环境质量。

参考文献

- 陈鹏飞,张蔷,权建农,等. 2012a. 北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究. 环境科学, 33(12): 4141-4150.
- 陈鹏飞,张蔷,权建农,等. 2012b. 北京地区 3500m 高空内污染物的时空分布特征. 中国环境科学, 32(10): 1729-1735.
- 高怡,张美根. 2014. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模式分析. 气候与环境研究, 19(2): 140-152.
- 高怡,张美根,朱凌云,等. 2010. 2008 年奥运会期间北京地区大气 O_3 浓度模拟分析. 气候与环境研究, 15(5): 643-651.
- 郭虎,付宗钰,熊亚军,等. 2007. 北京一次连续重污染过程的气象条件分析. 气象, 33(6): 32-36.
- 何心河,马建中,徐敬,等. 2016. 2014 年 10 月京津冀地区一次 $PM_{2.5}$ 污染过程的数值模拟. 气象, 42(7): 827-837.
- 花丛,张恒德,张碧辉. 2016. 2013—2014 冬半年北京重污染天气气象传输条件分析及预报指数初建. 气象, 42(3): 314-321.
- 贾星灿,郭学良. 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究. 大气科学, 36(5): 995-1008.

- 任阵海,万本太,苏福庆,等. 2004. 当前我国大气环境质量的几个特征. 环境科学研究, 17(1):1-6.
- 孙韧,刘伟,张赞,等. 2005. 城市典型气象条件与大气颗粒物污染之间的关系. 中国环境监测, 21(2):80-83.
- 孙扬,王跃思,李昕,等. 2006a. 北京地区一次持续重污染过程 O_3 、 NO_x 、CO 的垂直分布分析. 地球物理学报, 49(6):1616-1622.
- 孙扬,王跃思,刘广仁,等. 2006b. 北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO_2 的垂直分布分析. 环境科学, 27(3):408-414.
- 唐孝炎,李金龙,栗欣. 1990. 大气环境化学. 北京:高等教育出版社.
- 王雪松,李金龙. 2002. 人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献. 中国环境科学, 22(6):501-505.
- 王雪松,李金龙,张远航,等. 2009. 北京地区臭氧污染的来源分析. 中国科学 化学, 9(6):548-559.
- 徐敬,丁国安,颜鹏,等. 2007. 北京地区 $PM_{2.5}$ 的成分特征及来源分析. 应用气象学报, 18(5):645-654.
- 徐敬,张小玲,赵秀娟,等. 2009. 夏季局地环流对北京下风向地区 O_3 输送的影响. 中国环境科学, 29(11):1140-1146.
- 徐晓峰,李青春,张小玲. 2005. 北京一次局地重污染过程气象条件分析. 气象科技, 33(6):543-547.
- 于淑秋,林学椿,徐祥德. 2002. 北京市区大气污染的时空特征. 应用气象学报, 13(S1):92-99.
- 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 2013. 我国雾霾成因及其治理的思考. 科学通报, 58(13):1178-1187.
- Jiang Fei, Wang Tijian, Wang Tingting et al. 2008. Numerical modeling of a continuous photochemical pollution episode in Hong Kong using WRF-Chem. Atmos Environ, 42(38):8717-8727.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. 2005. Fully coupled online chemistry within the WRF model. Atmos Environ, 39(37):6957-6975.
- He Hui, Tie Xuexi, Zhang Qiang, et al. 2015. Analysis of the causes of heavy aerosol pollution in Beijing, China: A case study with the WRF-Chem model. Particuology, 20(1):32-40.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snowfield in a cloud model. J Climate Appl Meteor, 22(6):1065-1092.
- NARSTOST. 2000. An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution: A North American Perspective. The NARSTO Synthesis Team, Palo Alto, CA.