

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.

2014 年 10 月京津冀地区一次 $PM_{2.5}$ 污染过程的数值模拟^{* 1}

何心河¹ 马建中¹ 徐 敬² 马志强² 薛 敏¹ 靳军莉¹

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089

提 要: 近年来我国东部尤其是华北地区的 $PM_{2.5}$ 污染逐年加重, 引起广泛关注。本文利用 WRF-Chem 模拟了 2014 年 10 月京津冀地区一次 $PM_{2.5}$ 重度污染过程, 研究造成此次过程的天气形势、污染物的时空分布特征以及一次、二次 $PM_{2.5}$ 对总浓度的贡献率, 并对污染最严重当日的 $PM_{2.5}$ 垂直分布进行详细分析。结果表明: 造成本次污染过程的是弱高压控制下的静稳天气系统, 地面主导风向为南风, 垂直方向上有逆温层, 抑制了污染物垂直方向上的扩散。发生污染时, $PM_{2.5}$ 的高浓度主要分布在北京南部、天津北部与河北接壤的区域, 二次 $PM_{2.5}$ 的贡献率大于一次 $PM_{2.5}$, 在清洁大气中则一次 $PM_{2.5}$ 的贡献更大。垂直方向上, $PM_{2.5}$ 中的一次颗粒物只在近地面有高浓度中心, 1.2~1.6 km 的上空高值区以二次生成的颗粒物为主, 是由前体物上升到高空后再通过氧化反应生成的, 当这部分颗粒物随着边界层落回近地面时会加重污染。随着时间的变化, 污染物的分布高度和边界层高度呈明显的正相关。

关键词: 气溶胶, $PM_{2.5}$, 大气污染, 京津冀, WRF-Chem 模式

中图分类号: P402, P435, X513

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.006

Simulation of a Heavy $PM_{2.5}$ Pollutant Event over Beijing-Tianjin-Hebei Region in October 2014

HE Xinhe¹ MA Jianzhong¹ XU Jing² MA Zhiqiang² XUE Min¹ JIN Junli¹

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, CMA, Beijing 100089

Abstract: In recent years, the eastern part of China, especially the Jing-Jin-Ji (shortly for Beijing-Tianjin-Hebei Region) has suffered increasingly severe pollution of $PM_{2.5}$. A case of $PM_{2.5}$ pollution over the Jing-Jin-Ji Region during the autumn of 2014 is studied with WRF-Chem model in this paper. The results show that the pollution was caused by a stable weak-high pressure system with the dominant southerly wind on the surface. The temperature inversion layer further suppressed the diffusion of pollutants in the vertical direction. High concentration of $PM_{2.5}$ mainly spread in southern Beijing, Tianjin and northern Hebei Province, where the contribution of secondary $PM_{2.5}$ was higher than that of primary $PM_{2.5}$ to most of the pollution areas. Vertically, the secondary inorganic particles accumulated around Beijing, then became a high concentration region affixed to the ground surface. On the other hand, there was a zone of high pollutants over 1.2—1.6 km, and primary pollutants only had one high value area near the surface. The vertical distribution height of $PM_{2.5}$ showed a similar trend with the boundary layer height.

Key words: aerosols, $PM_{2.5}$, atmospheric pollution, Beijing-Tianjin-Hebei Region, WRF-Chem model

* 国家自然科学基金重点项目(41330422)资助

2015 年 4 月 21 日收稿; 2015 年 12 月 28 日收修定稿

第一作者: 何心河, 主要从事大气化学数值模拟研究. Email: inhermind227@gmail.com

通信作者: 马建中, 主要从事大气化学与大气环境研究. Email: mjz@camsma.cn

引 言

大气气溶胶是悬浮在大气中的液态或固态小颗粒,是大气的重要组成部分,PM_{2.5}是指粒子直径小于或等于 2.5 μm 的气溶胶,又称为细颗粒物。PM_{2.5}在大气中停留时间长、输送距离远、比表面积较大、容易富集有毒物质,并能直接进入人体肺部甚至血液,对健康造成严重威胁。PM_{2.5}的重要人为源是矿物燃料燃烧产生的一次气溶胶和二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等气体在大气中经过一系列光化学、氧化反应生成的硫酸盐(SO₄²⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)等二次气溶胶(唐孝炎等,2006)。我国处于高度经济发展阶段,沿海发达城市分布着许多工厂,同时机动车的数量也在逐年增长,大量煤炭、汽油等矿物质燃料的燃烧是 PM_{2.5}的重要来源,其中北京、天津、河北(以下简称京津冀)地区是我国 PM_{2.5}污染最严重的区域(Ma et al, 2012a; Zhang et al, 2013; Che et al, 2014)。

风、温度、相对湿度和边界层高度等气象条件对 PM_{2.5}浓度的分布具有很大的影响(蔡子颖等, 2014; 曹伟华等, 2013; 姚青等, 2012a; 2012b)。高怡等(2014)指出静小风、偏高的温度和相对湿度利于污染物的积累,Chan 等(2008)发现空气质量指数和大气气压显著相关,持续的低压导致了空气质量指数的上升,Quan 等(2014)则探讨了 PM_{2.5}浓度和边界层高度的相互反馈机制。从总体天气形势看,PM_{2.5}污染一般发生在对流层低层为弱高压脊(张人禾等,2014),东亚大槽和东亚季风都有所减弱的形式下,或者发生于较弱的均压场(张小曳等,2013)。靳军莉等(2014)的研究结果显示,京津冀地区 PM_{2.5}污染呈现区域性高值、污染具有局地积累以及由南向北输送的特征。

关于我国气溶胶的化学组成也有许多研究,Zhang 等(2012)指出矿物气溶胶是中国大气气溶胶中含量最大的组分,其次是硫酸盐和有机碳气溶胶(OC)。徐敬等(2007)和杨勇杰等(2008)对北京地区 PM_{2.5}的成分和来源进行分析,发现 SO₄²⁻, NO₃⁻和 NH₄⁺为北京地区 PM_{2.5}的主要离子。已有的研究表明,污染物的累积及光化学和非均相反应会造成大量二次气溶胶的生成,这是华北地区雾霾形成的主要原因(Ma et al, 2010; 2012b; Zhao et al, 2013; 张小曳, 2014; 吴兑, 2005)。

大气环境模式被广泛应用于对气溶胶污染的研究中。许多研究利用 WRF-Chem 对我国华北地区的 PM_{2.5}污染进行模拟研究(韩素芹等,2008; 张小玲等 2014; Jiang et al, 2012; Zhang et al, 2013; An et al, 2007; 王自发等, 2008)。PM_{2.5}的污染往往是区域性的,除了水平方向的输送,垂直方向上也存在区域性的分布差异和相互输送过程,目前对北京、天津秋季的 PM_{2.5}垂直分布的观测研究较多(马新成等, 2011; 徐宏辉等, 2008; 孙玫玲等, 2008; 宋宇等, 2002),但模拟研究比较少。

冬季的 PM_{2.5}污染是许多研究的主要对象,尤其是 2013 年 1 月出现的严重污染现象(张人禾等, 2014; 花丛等, 2015; 张小玲等, 2014; 关月等, 2013),而对京津冀地区秋季污染的研究较少。秋季和冬季相比,气体前体物排放量不同、平均边界层高度更高,污染物垂直分布变化更加明显、光化学反应更强烈,容易发生以二次污染物为主的 PM_{2.5}污染过程。本文利用中尺度大气-化学耦合模式 WRF-Chem 对 2014 年秋季京津冀地区的 PM_{2.5}进行模拟,分析了 10 月一次 PM_{2.5}污染过程中的天气形势,刻画了区域 PM_{2.5}浓度变化的时间序列,并研究了其重要组成部分的水平、垂直分布特征,探讨一次、二次颗粒物的不同分布特点和扩散趋势。

1 模拟介绍与方案设计

1.1 参数方案

WRF(Weather Research Forecast)模式系统是新一代中尺度预报模式和同化系统,重点考虑从云尺度到天气尺度等重要天气的预报。WRF-Chem 是 WRF 与 Chem 化学模块在线耦合的大气化学模式。WRF 气象模式提供了多种物理参数化方案,Chem 模块中也包括了多种气态和气溶胶化学机制。本文在参考其他方案设计,反复验证模拟效果的基础上选取了如表 1 所示的物理和化学方案。其中气溶胶 MOSAIC(the Model for Simulation Aerosol Interactions and Chemistry)方案是目前 WRF-Chem 应用中的主流气溶胶模块,它较全面地考虑到有机、无机气溶胶及挥发性有机物:SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OC、BC、Cl⁻、Na⁺、其他无机物(Other inorganics, OIN)等,并将气溶胶按其粒径大小分为 8 组,直径在 2.5 μm 以下有 6 组,2.5 μm 以上有

2 组。上一代气溶胶模块 MADE-SORGAM (Secondary Organic Aerosol Model) 中将二次有机气溶胶 (SOC) 的相互作用假设为准理想状态下的反应, 但由于 SOC 的生成机制复杂, 总体来说模拟效果不够理想, 所以新一代的 MOSAIC 中尚未考虑对 SOC 的模拟。

表 1 参数方案

Table 1 Parameters for simulation

物理/化学模块名称	参数方案
微物理过程方案	Lin
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Goddard
陆面方案	NOAH
边界层方案	YSU
积云对流参数化方案	Grell-3
气相反应方案	CBMZ
气溶胶反应方案	MOSAIC
光解方案	Fast-J

1.2 模拟方案设计

2014 年 10 月, 京津冀地区遭遇了大范围持续性的雾霾天气过程(于超等, 2015), 根据中国环境监测总站发布的空气质量状况报告, 2014 年 10 月京津地区 13 个城市的 PM_{2.5} 月均浓度为 93 μg · m⁻³, 和去年同期相比上升了 2.7%, 北京市 PM_{2.5} 月均浓度达 119 μg · m⁻³, 为 2014 年 PM_{2.5} 浓度最高的月份, 重度及以上污染天数和去年同期相比增加了 5 d。可见 2014 年 10 月的 PM_{2.5} 污染程度相比同年冬季更高, 这在秋季较为少见, 是值得研究的过程。

从中国环境保护部数据中心提供的城市空气质量指数(AQI)日报(图 1)可以看到, 京津冀地区几大重要城市在 10 月发生了 3 次 PM_{2.5} 污染过程, 其中 10 月 6—12 日的一次污染过程持续的时间最长,

保定(BD)、石家庄(SJZ)、北京(BJ)的 AQI 在 8—10 日持续 3 d 在 300 以上, 为严重污染, 天津(TJ)在 200 以上, 为重度污染, 因此本文选取这次污染过程作为模拟研究对象。

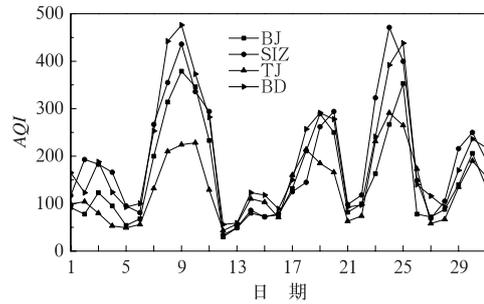


图 1 2014 年 10 月北京、石家庄、天津和保定的 AQI 日报
Fig. 1 AQI daily report over BJ, SJZ, TJ and BD in October 2014

如图 2 所示, 本文选取两个区域范围分别用于中尺度天气系统和京津冀地区污染的模拟, 中尺度区域(图 2a)包括了大部分中国地区、蒙古及俄罗斯南部, 网格水平分辨率为 24 km, 范围 19°~47°N、91°~128°E(下文对气压系统的分析使用这一区域 WRF 输出结果)。京津冀模拟区域的范围是 34°~44°N、110°~122°E(图 2b), 水平分辨率为 9 km, 格点数为 156 × 111, 垂直方向加密处理后一共有 48 个 eta 层(下文对站点的结果对比和污染物分布的研究使用这一区域 WRF-Chem 输出结果)。此外, 本文还选取从济南(JN, 36.5°N、116.22°E)到北京市昌平站(CP, 40.2°N、116.22°E)的经向路径用于研究污染物的垂直分布。

本文主要使用观测资料所在站点也在图 2b 中标注, 其中中国气象局北京城市气象研究所提供了

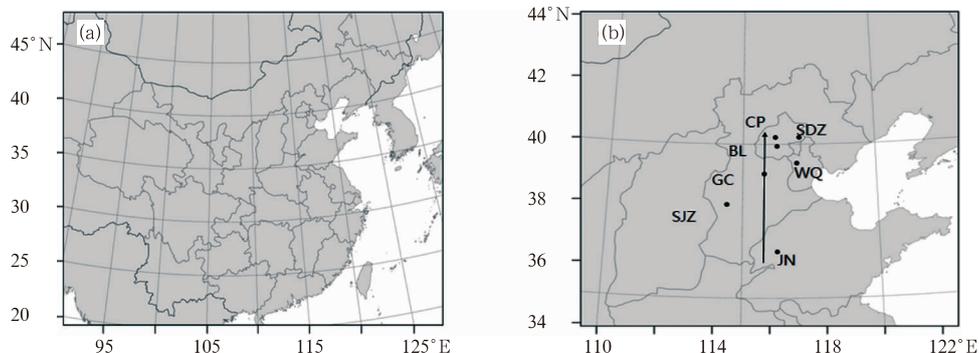


图 2 气象场模拟区域(a)及大气化学模拟区域和站点示意(b)
Fig. 2 Meteorological simulation area (a) and atmospheric chemical simulation and stations (b)

北京市宝联站(BL, 30. 86°N、119. 98°E)和昌平站的逐小时 PM_{2.5} 观测资料; 中国气象局大气探测中心提供了北京上甸子站(SDZ, 40. 65°N、117. 12°E)、河北省石家庄站(SJZ, 38. 3°N、114. 42°E)、保定市固城镇站(GC, 39. 03°N、115. 8°E)及天津武清站(WQ, 39. 38°N、117. 02°E)的日均 PM_{2.5} 观测值。以上站点的气象要素资料由国家气象信息中心提供, 主要包括逐小时的近地面温度、相对湿度和风速。

模式所用的气象初始和边界资料为 NCEP 提供的 FNL 再分析资料, 并利用 WRF 的 Objective Analysis 前处理程序和 fdda(four-dimensional data assimilation) 同化模块, 将 GFS 站点观测数据中的温度、相对湿度、风向和风速经过插值处理后用于校正模式的初始场和边界场。

本文使用的 SO₂、NO_x、一氧化碳(CO)、臭氧(O₃)、挥发性有机化合物(VOCs)、BC、OC、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 人为排放源由清华大学提供, 精度为 0. 1° × 0. 1°, 由电力、工业、民用和运输 4 个部分组成, 基准

年份为 2010 年, 并由北京城市气象研究所改进加入了排放源的日变化和月变化信息; NH₃ 为 Zhao 等(2012)提供的 2003 年排放源。

2 模式结果验证

2.1 气象要素模拟结果验证

表 2 为 WRF-Chem 对宝联、上甸子、昌平和武清的气象要素模拟结果。可以看出模式对温度和湿度的模拟效果较好: 温度的模拟值与观测值的可决系数(R^2)都在 0. 9 以上, 平均偏差均小于 1, 拟合效果很好; 宝联和武清站的相对湿度平均标准偏差较小, 上甸子和昌平站的偏差偏大, 对湿度高估了 10% 左右。近地面风速的 R^2 在 0. 15~0. 39, 拟合效果一般, 可能是由于风速的波动较大, 但平均偏差很小, 说明模式通过 3 h 一次的边界强迫, 能较好地模拟出整体风速较小的状态。

表 2 北京和天津站点的气象因子的观测值与模拟值统计分析

Table 2 Comparison between observed and simulated data for Beijing and Tianjin Stations

		样本数	观测平均值	模拟平均值	平均偏差	R^2	标准平均偏差
地面温度 /°C	北京宝联	1321	9. 77	10. 55	0. 78	0. 92	5. 96
	北京上甸子	1321	7. 78	7. 34	-0. 44	0. 91	6. 50
	北京昌平	1321	10. 03	10. 08	0. 05	0. 91	6. 10
	天津武清	1321	11. 04	10. 34	-0. 70	0. 91	6. 17
相对湿度 /%	北京宝联	1321	65. 12	59. 66	-5. 46	0. 78	1. 11
	北京上甸子	1321	54. 91	65. 27	10. 37	0. 74	25. 84
	北京昌平	1321	51. 73	62. 37	10. 63	0. 52	24. 59
	天津武清	1321	58. 12	53. 56	-4. 56	0. 56	2. 71
平均风速 /m · s ⁻¹	北京宝联	1321	1. 12	1. 62	0. 50	0. 39	1. 11
	北京上甸子	1321	2. 29	1. 72	-0. 57	0. 25	1. 24
	北京昌平	1321	1. 74	1. 99	0. 26	0. 15	1. 28
	天津武清	1321	1. 43	1. 87	0. 45	0. 32	1. 23

图 3 为宝联、上甸子和武清站的温度、相对湿度、风速日均模拟值与观测值的时间序列, 模式很好地模拟出了气象要素的变化趋势, 风速在经过日平均计算之后趋势也比较吻合。总体来说, WRF-Chem 较好地模拟了 2014 年 10 月的气象因子, 这也是开展化学模拟的前提。

2.2 PM_{2.5} 模拟结果验证

模式对京津冀地区多个站点的 PM_{2.5} 日均质量浓度模拟效果如图 4 所示, 模式较好地模拟出了颗粒物浓度的变化趋势, 但对 10 月 9—19 日的 PM_{2.5}

高值的模拟普遍偏低, 表 3 为模式输出的 7—12 日污染过程中各站点的 OC/BC 比值, 可以看到宝联站 OC 平均值为 BC 的 1. 14 倍, 武清站最高为 1. 5 倍, 这和 Duan 等(2005)观测的 3 倍(北京地区, 2002 年秋季)及颜鹏等(2012)观测的 4~6 倍(北京上甸子, 2004 年)相比偏低, 再参照观测中 SOC 对总 OC 的贡献率在 50% 以上, 说明 MOSAIC 气溶胶模块对 SOC 模拟的缺失可能是导致 PM_{2.5} 模拟偏低的原因。特别地, 在出现严重污染的 10 月 9 和 10 日, 固城站的模拟最大值低于 150 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 相比观测值低估了 50 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 可能是排放源未

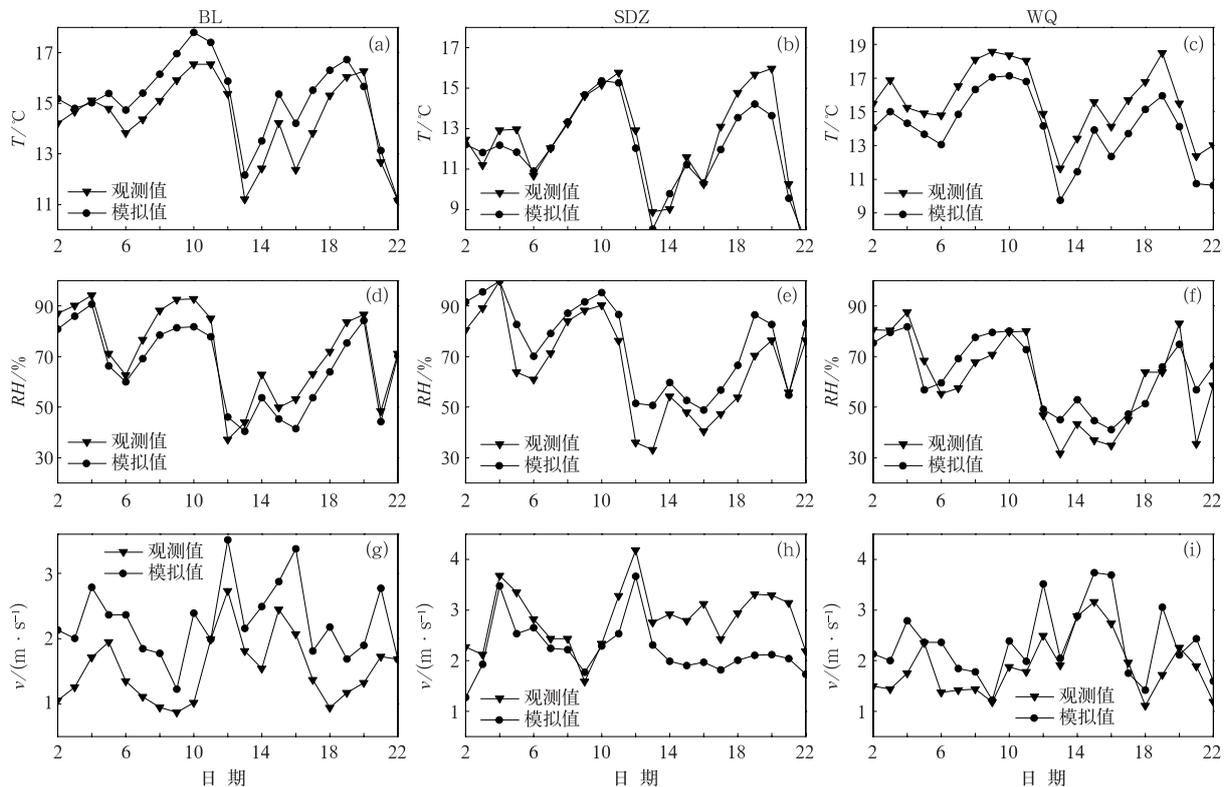


图 3 宝联(a,d,g)、上甸子(b,e,h)、武清站(c,f,i)的温度(a,b,c)、相对湿度(d,e,f)和风速(g,h,i)观测-模拟值时间序列

Fig. 3 Time series of the observed and simulated temperature (a,b,c), relative humidity (d,e,f) and wind velocity (g,h,i) at Stations of BL (a,d,g), SDZ (b,e,h) and WQ (c,f,i)

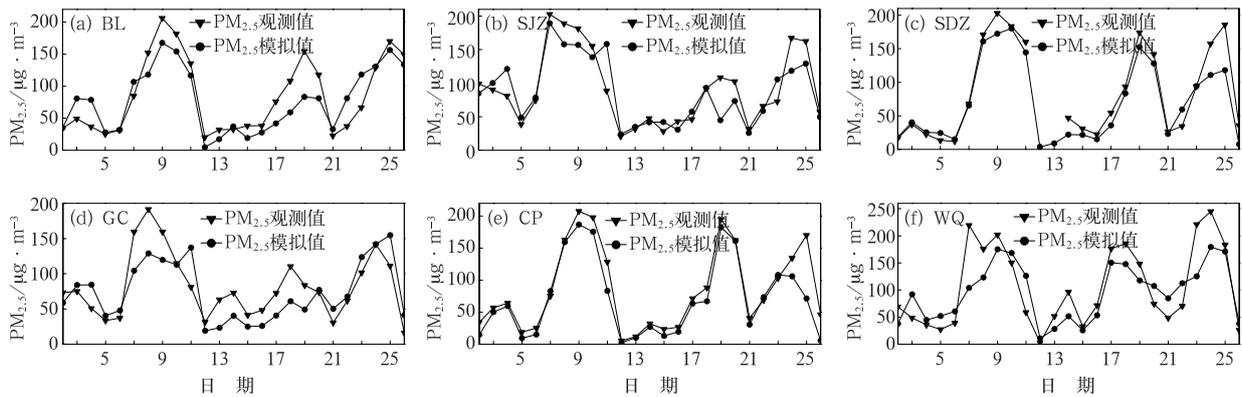


图 4 2014 年 10 月京津冀多站点的 PM_{2.5} 日均观测值与模拟值的时间序列
Fig. 4 Time series of the observed and simulated daily average concentration of PM_{2.5} at BL, SJZ, SDZ, GC, CP, and WQ in October 2014

考虑农村地区短期的秸秆燃烧排放造成的。

3 PM_{2.5} 污染个案分析

3.1 气象条件分析

10 月 9 日,华北地区地面主要受弱高压后部控

制(图 5),等压线分布稀疏,在京津冀区域基本为均压场;850 hPa 高度上,京津冀地区位于高压脊的后部,高压脊内气流下沉;500 hPa 上我国基本受纬向环流控制,华北地区上空风速尤其小,和地面弱高压配合形成稳定的天气系统,非常不利于污染物的扩散。10 月 11 日之后,来自蒙古的冷高压逐渐南下,从地面气压场可以看到华北地区位于高压前部,等

压线密集,地面风转为较强的北风;500 hPa 上纬向气流开始向经向转变,华北、华中一带基本为西南风控制,与地面的偏北风形成良好的环流,利于污染物在水平、垂直方向的扩散。

总体来说,造成此次污染过程的中尺度天气系统是:平直的高空环流,中层受弱高压脊控制,配合地面均匀的弱高压。静稳的天气系统下水平风速小,垂直对流弱,容易形成逆温层,综合起来容易导致颗粒物的堆积。

表 3 2014 年 10 月 7—12 日京津冀多站点 OC/BC 模拟值
Table 3 Simulated OC/BC at BL, CP, SDZ, SJZ, GC and WQ in 7—12 October 2014

日期	BL	CP	SDZ	SJZ	GC	WQ
7	1.12	1.18	1.37	1.38	1.51	1.44
8	1.20	1.23	1.36	1.37	1.52	1.43
9	1.17	1.24	1.36	1.43	1.53	1.44
10	1.16	1.24	1.33	1.45	1.29	1.50
11	1.12	1.19	1.24	1.38	1.30	1.53
12	1.08	1.14	1.32	1.40	1.26	1.69
平均	1.14	1.20	1.33	1.40	1.40	1.50

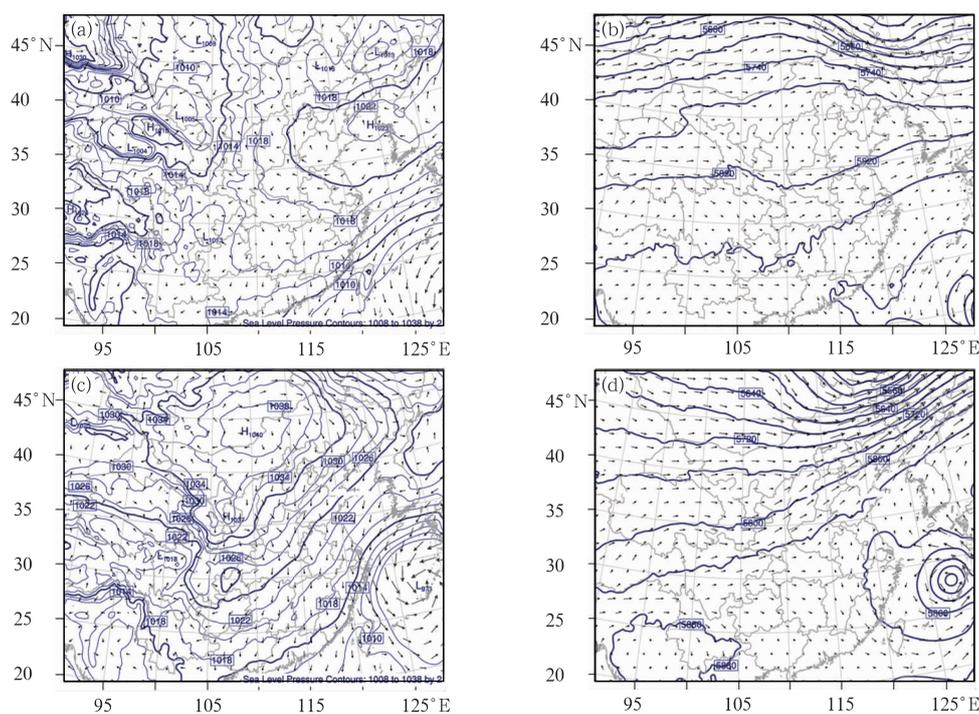


图 5 2014 年 10 月 9 日(a,b)和 12 日(c,d)的海平面气压(a,c; 单位:hPa)和 500 hPa 位势高度(b,d;单位:gpm)及对应风场

Fig. 5 Sea level pressure (a,c,unit: hPa), height at 500 hPa (b,d, unit: gpm) and wind on 9 (a,b) and 12 (c,d) October 2014

3.2 近地面 $PM_{2.5}$ 的水平分布特征及一次、二次 $PM_{2.5}$ 对总浓度的贡献率

图 6 为 $PM_{2.5}$ 近地面日平均浓度的水平分布图。10 月 7 日整个华北大地区的 $PM_{2.5}$ 浓度在 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,北京南部、天津北部与河北接壤的区域存在小范围 $80 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的轻度污染,至 9 日,以太行山为界,山脉以南的京津冀大部分地区浓度在 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,之前轻度污染的区域上升到了中度污染以上,其中天津东北部 $PM_{2.5}$ 浓度在 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。由于地面风速较小,这样的

污染状况一直持续到了 10 日,配合南风的输送作用,部分污染物扩散到了太行山以北的地区。从 11 日起,北方冷气团逐渐南下,先是清除了太行山以北地区的污染物,之后地面风向逐渐由南风转为偏北风,风速增大,至 12 日京津冀北部的 $PM_{2.5}$ 基本被清除,快速向南方扩散和稀释,污染过程结束。

模式输出的一次 $PM_{2.5}$ 包括 BC、OC 和 OIN,分布主要受重力、风、地形抬升等动力过程的影响;二次 $PM_{2.5}$ 包括 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ ,二次颗粒物除了在 SO_2 、 NO_x 排放源附近直接通过氧化生成,还有可能由扩散到高空的前体物在强氧化性的区域

再次生成。从污染过程中的一次、二次PM_{2.5}对总浓度的贡献率(图7)可以看到,在污染刚开始的10月7日,一次、二次PM_{2.5}对轻度污染地区的贡献率基本都在50%左右,太行山以北的区域由于变地形阻隔,污染初期输送来的一次污染物很少,二次PM_{2.5}的贡献率高达75%~80%。到了污染严重的9日,污染区域的二次PM_{2.5}贡献率上升,大部分在60%以上,其中对北京地区的贡献率高达70%~

75%,污染最为严重的天津中北部在75%以上,说明此次PM_{2.5}污染的重要成分是城市地区排放的SO₂、NO_x等气体在强氧化性的大气中通过化学反应二次生成的SO₄²⁻、NO₃⁻等。12日污染物逐渐消散时,一部分低浓度的PM_{2.5}集中在河北南部,一次PM_{2.5}对这一部分的贡献率反超二次PM_{2.5}的贡献率,说明在较为清洁的空气中,PM_{2.5}的主要成分是矿物质气溶胶等一次颗粒物。

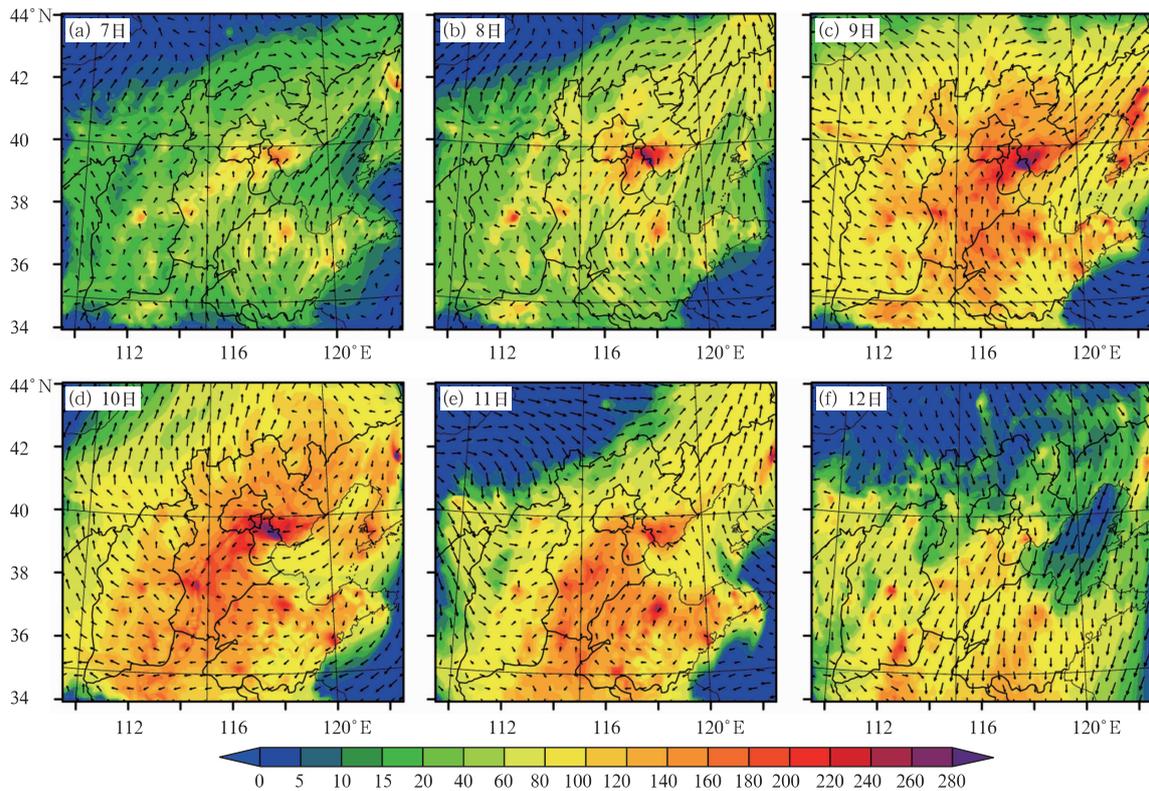


图6 2014年10月7—12日PM_{2.5}日平均浓度分布(单位:μg·m⁻³)

Fig. 6 Daily average concentration of PM_{2.5} in 7-12 October 2014 (unit: μg·m⁻³)

3.3 总PM_{2.5}及一次、二次组分的垂直分布特征

本文根据污染期间的主导风向,选取从山东济南至北京昌平区北部太行山脚、途径山东德州(DZ)、河北霸州(BZ)的经向路径做100 m至2 km的PM_{2.5}垂直分布图。图8为10月9日污染当天总PM_{2.5}和其中一次、二次PM_{2.5}的浓度变化。可以看出细颗粒物在10月9日一天内的PM_{2.5}分布随着边界层高度有明显变化,并沿水平风的方向有着区域性输送,其中一次、二次污染物的分布特征也有不同。

02—08时(以下均为北京时),整个区域的边界

层高度都在100 m以下,北京附近的边界层最低,PM_{2.5}的高值也出现在这一区域的近地面,中心浓度大于130 μg·m⁻³的区域高度不超过300 m,较低的边界层高度抑制了颗粒物垂直方向的扩散运动,近地面的污染物主要集中在排放源高的地区。值得注意的是,在边界层以上,1.2~1.6 km的高度上,还存在一个PM_{2.5}浓度在70 μg·m⁻³左右的轻度污染区。随着太阳辐射的加强,垂直方向对流也增强,边界层高度从早上开始不断抬升,到14时最高达到了1 km以上,北京周边近地面的PM_{2.5}逐渐向上扩散,和上层的浓度中心混合,形成了分布更广的污染区域,但最高值有所下降。日落之后,边界层高

度迅速回落至 100 m 左右,再到凌晨边界层高度进一步下沉,近地面的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升。夜间的一次排放源和白天相比是偏低的,可见上空的细颗粒物受层结的影响又回落至近地面,导致浓度的回升。

对比 00 与 08 时地面高值所在的纬度,河北、北京两处高值中心都略微向北移动,这反映了水平方向上南风对颗粒物的输送作用。

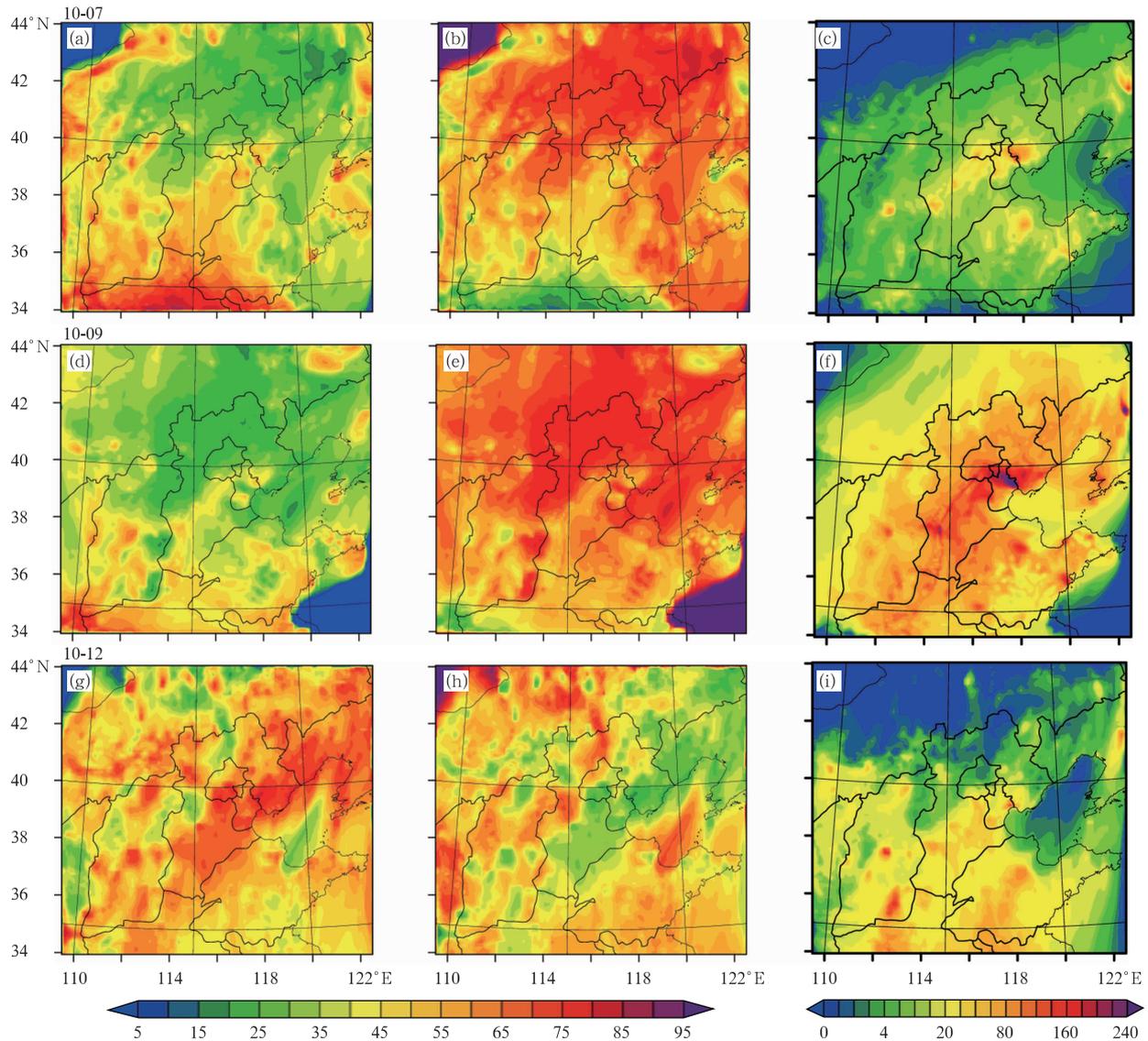


图 7 2014 年 10 月 7 日(a,b,c)、9 日(d,e,f)和 12 日(g,h,i)一次 $\text{PM}_{2.5}$ (a,d,g) 和二次 $\text{PM}_{2.5}$ (b,e,h) 对总浓度(c,f,i)的贡献率(单位:%)和总浓度(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)对照图
Fig. 7 The contribution (unit: %) of primary $\text{PM}_{2.5}$ (a,d,g) and secondary $\text{PM}_{2.5}$ (b,e,h) to total concentration and the comparison of $\text{PM}_{2.5}$ total concentrations (c,f,i, unit: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) on 7 (a,b,c), 9 (d,e,f) and 12 (g,h,i) October 2014

一次、二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直分布特征不同,在不同高度上对总 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率也有很大区别。在北京近地面的总 $\text{PM}_{2.5}$ 高值区,一次、二次 $\text{PM}_{2.5}$ 也都存在一个高浓度区域,变化趋势和总浓度较为一致,扩散高度和边界层高度的变化呈正相关。02—08 时,这一区域一次、二次 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的高值都在 $60\sim 70$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率相当。除了近地面,在河北霸州至北京上空 $1.2\sim 1.6\text{ km}$ 的区域也存在一个 $50\sim 60\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染区,其中二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的分布和总浓度类似,高值区浓度为 $40\sim 45\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而一次在同一区域的浓度仅为 $10\sim 15\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。同一时刻,近地面一次、二次 $\text{PM}_{2.5}$ 对

总浓度的贡献率大概为 5 : 6, 高空为 1 : 4 左右, 可见高空总 PM_{2.5} 的除了少部分的动力输送来源, 更多的是在高空通过氧化反应二次生成的。08—11 时, 近地面高值区域中一次 PM_{2.5} 对总浓度的贡献率在 40% 以上, 而到了 14 时, 一次 PM_{2.5} 的浓度骤减, 中心值只有 25~30 μg · m⁻³, 这是由于垂直方向较强烈的混合作用使得边界层上部浓度很低的区域和下部的污染中心混合, 稀释了整个中心的浓度

值; 二次 PM_{2.5} 上下层污染混合后成为一个新的高值中心, 中心的下端脱离了地面达到 400 m 左右, 上端受边界层的影响在 1 km 左右。到了 20 时, 边界层和混合后的污染物都回落近地面, 造成夜间污染浓度的上升。可以说, 白天在边界层上部二次生成的 PM_{2.5} 在经过混合、下沉后会加重近地面的污染状况。

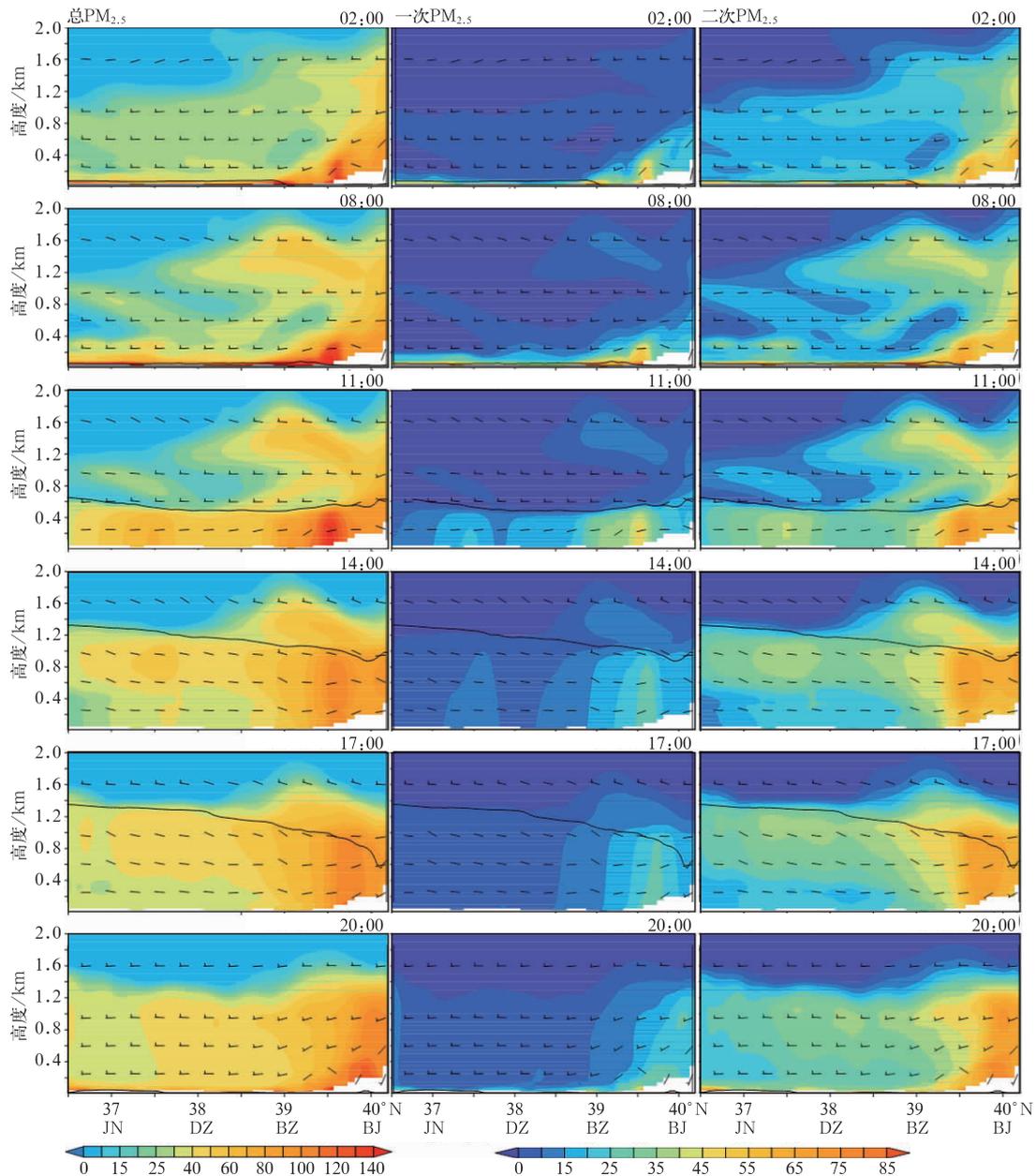


图 8 2014 年 10 月 9 日总 PM_{2.5}(左侧)、一次(中间)和二次 PM_{2.5}(右侧)

质量浓度(单位: μg · m⁻³)的垂直分布和边界层高度变化(黑色实线)

Fig. 8 Vertical profiles of total PM_{2.5} (left), primary PM_{2.5} (middle) and secondary PM_{2.5} (right) mass concentration (unit: μg · m⁻³) and planetary boundary layer height (black line) on 9 October 2014

除了经向上的垂直分布,本文选取宝联单站的 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直分布时间序列(图 9)研究其变化特征。和上文得出的结论类似: $\text{PM}_{2.5}$ 在垂直方向上的分布高度和边界层高度有明显的正相关性。再结合几个时段的垂直温度廓线(图 10)来看,除了 14 时的温度随高度呈现减小的规律,08 和 20 时均在 300~500 m 的近地面存在上层温度高于下层的逆温现象,受逆温层影响的地区大气趋于稳定,不易发生对流,利于污染物的堆积。10 日 02 时,宝联站还存在从地面至 100 m 的贴地逆温,这种垂直方向上十分稳定的状态也是造成此次持续污染过程的原因之一。

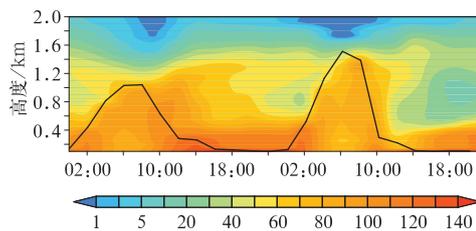


图 9 2014 年 10 月 9 日 08 时至 11 日 08 时宝联站垂直方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 分布(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和边界层高度(黑色实线)

Fig. 9 Vertical profiles of hourly $\text{PM}_{2.5}$ (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) and planetary boundary layer height (black line) at BL Station from 08:00 BT 9 to 08:00 BT 11 October 2014

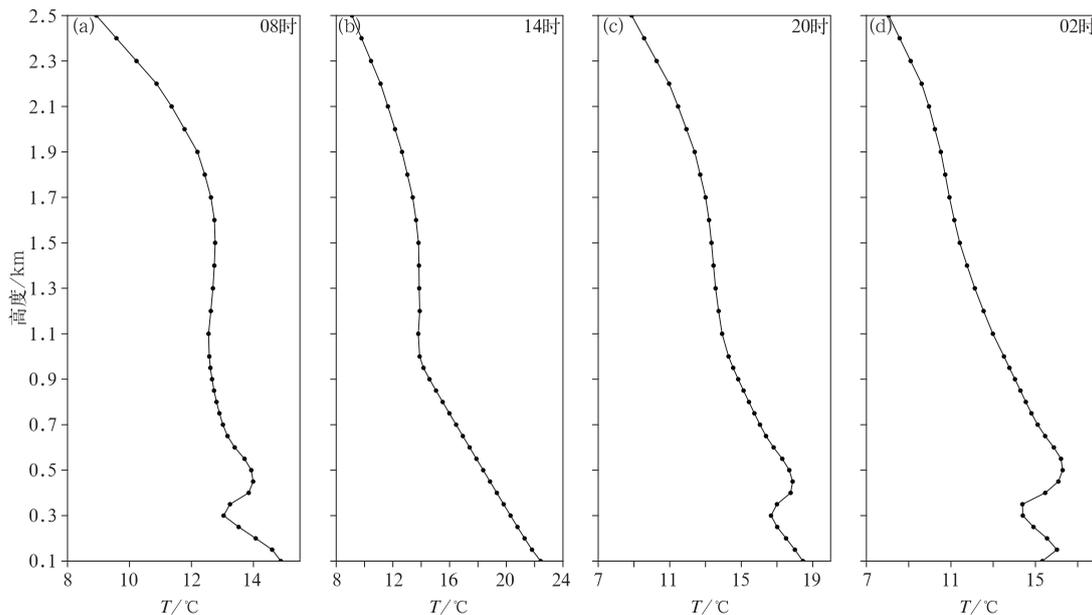


图 10 2014 年 10 月 9—10 日多时段温度垂直廓线

Fig. 10 Vertical distribution of temperature in 9—10 October 2014

4 结 论

本文利用 WRF-Chem 中尺度气象化学耦合模式对 2014 年 10 月 7—12 日京津冀地区一次 $\text{PM}_{2.5}$ 污染个例进行模拟研究,研究造成污染过程的天气形势、污染物的时空分布特征以及一次、二次颗粒物对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献,并对 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直分布进行了详细分析。结果表明:

(1) 造成本次污染过程的是弱高压控制下的静稳天气系统,地面主导风向为南风,垂直方向上有逆温层的存在,进一步抑制了污染物垂直方向上的扩散。

(2) 本次污染的 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度主要分布在北京南部、天津北部与河北接壤的区域。污染物除了在排放源地累积,还沿着南风的输送堆积到太行山脚附近,二次生成的 $\text{PM}_{2.5}$ 则分布得更广,且在污染最严重的 9 日,对京津冀污染区域的贡献率在 70% 以上,远大于一次 $\text{PM}_{2.5}$,在污染消散后的清洁大气中一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率高于二次 $\text{PM}_{2.5}$ 。

(3) 垂直方向上,10 月 9 日污染当日, $\text{PM}_{2.5}$ 中一次颗粒物只在近地面存在高值中心,在 02—11 时对总浓度的贡献率达 40% 以上,1.2~1.6 km 的上空高值区以二次生成的颗粒物为主,是由前体物上升到高空后再通过氧化反应生成的,这部分二次 $\text{PM}_{2.5}$ 随着边界层的变化,正午先与下层污染物混

合,夜间再一同落回近地面,导致污染的加重。

(4)从纬向剖面和时间剖面都可以得出:污染物的分布高度和边界层高度呈明显的正相关。

参考文献

- 蔡子颖,刘爱霞,韩素芹,等.2014.天津低能见度特征初探.气象,40(1):114-118.
- 曹伟华,梁旭东,李青春.2013.北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析.气象学报,71(5):940-951.
- 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拟分析.气候与环境研究,19(2):140-152.
- 关月,何立富.2013.2013年1月大气环流和天气分析.气象,39(4):531-536.
- 韩素芹,冯银厂,边海,等.2008.天津大气污染物日变化特征的WRF-Chem数值模拟.中国环境科学,28(9):828-832.
- 花丛,张碧辉,张恒德.2015.2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析.气象,41(9):1144-1151.
- 靳军莉,颜鹏,马志强,等.2014.北京及周边地区2013年1—3月PM_{2.5}变化特征.应用气象学报,25(6):690-700.
- 马新成,吴宏议,嵇磊,等.2011.北京春季不同天气条件下气溶胶垂直分布特征.气象,37(9):1126-1133.
- 宋宇,唐孝炎,方晨,等.2002.北京市大气细粒子的来源分析.环境科学,23(6):11-16.
- 孙玫玲,穆怀斌,吴丹朱,等.2008.天津城区秋季PM_{2.5}质量浓度垂直分布特征研究.气象,34(10):60-66.
- 唐孝炎,张远航,邵敏.2006.大气环境化学.北京:高等教育出版社,269-330.
- 王自发,庞成明,朱江,等.2008.大气环境数值模拟研究新进展.大气科学,32(4):987-995.
- 吴兑.2005.关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论.气象,31(4):3-7.
- 徐宏辉,王跃思,温天雪,等.2008.北京秋季大气气溶胶质量浓度的垂直分布.中国环境科学,28(1):2-6.
- 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.
- 颜鹏,郇宁,张养梅,等.2012.北京乡村地区分粒径气溶胶OC及EC分析.应用气象学报,23(3):285-293.
- 杨勇杰,王跃思,温天雪,等.2008.北京市大气颗粒物中PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度及其化学组分的特征分析.环境化学,29(11):3275-3279.
- 姚青,蔡子颖,韩素芹,等.2012a.2009年秋冬季天津低能见度天气下气溶胶污染特征.气象,38(9):1096-1102.
- 姚青,韩素芹,蔡子颖.2012b.天津一次持续低能见度事件的影响因素分析.气象,38(6):688-694.
- 于超,张芳华.2015.2014年10月大气环流和天气分析.气象,41(1):126-132.
- 张人禾,李强,张若楠.2014.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析.中国科学 地球科学,44(1):27-36.
- 张小玲,唐宜西,熊亚军,等.2014.华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验.中国科学院大学学报,31(3):337-344.
- 张小曳.2014.中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征.气象学报,72(6):1108-1117.
- 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.
- 赵斌,马建中.2008.天津市大气污染源排放清单的建立.环境科学学报,28(2):368-375.
- An X, Zhu T, Wang Z, et al. 2007. A modeling analysis of a heavy air pollution episode occurred in Beijing. Atmos Chem Phys, 7:3103-3114.
- Chan C K, Yao X. 2008. Air pollution in mega cities in China. Atmos Environ, 42(1):1-42.
- Che H, Xia X, Zhu J, et al. 2014. Column aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during a serious haze-fog month over North China Plain in 2013 based on ground-based sunphotometer measurements. Atmos Chem Phys, 14(4):2125-2138.
- Duan F, He K, Ma Y, et al. 2005. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China. Chemosphere, 60(3):355-364.
- Jiang F, Liu Q, Huang X, et al. 2012. Regional modeling of secondary organic aerosol over China using WRF/Chem. J Aero Sci, 43(1):57-73.
- Ma J Z, Chen Y, Wang W, et al. 2010. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China. J Geophys Res, 115(18):311-391.
- Ma J Z, Xu X B, Zhao C S, et al. 2012a. A review of atmospheric chemistry research in China: Photochemical smog, haze pollution, and gas-aerosol interactions. Adv Atmos Sci, 29(5):1006-1026.
- Ma J Z, Wang W, Chen Y, et al. 2012b. The IPAC-NC field campaign: A pollution and oxidization pool in the lower atmosphere over Huabei, China. Atmos Chem Phys, 12(9):3883-3908.
- Quan J, Tie X, Zhang Q, et al. 2014. Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China. Atmos Environ, 88(5):83-89.
- Zhang R J, Jing J, Tao J, et al. 2013. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: Seasonal perspective. Atmos Chem Phys, 13(14):7053-7074.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. Atmos Chem Phys, 12(2):779-799.
- Zhao B, Wang P, Ma J Z, et al. 2012. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China. Atmos Chem Phys, 12(1):481-501.
- Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. 2013. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain. Atmos Chem Phys, 13(11):5685-5696.