

李恬, 王宏, 赵天良, 等. 2016. 山东一次 PM_{2.5} 污染过程的模拟特征 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 313–322. Li Tian, Wang Hong, Zhao Tianliang, et al. 2016. A modeling study on characteristics of a PM_{2.5} pollution process in Shandong Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 313–322, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15187.

山东一次 PM_{2.5} 污染过程的模拟特征

李恬¹ 王宏^{2,1} 赵天良¹ 王亚强² 谭成好¹ 张磊¹

¹ 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

² 中国气象科学研究院灾害性天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要 利用 Weather Research and Forecasting/Chemistry (WRF/Chem) 空气质量模式模拟研究了山东地区 2014 年 2 月 21~26 日期间的中度细颗粒物 (PM_{2.5}) 污染过程, 并从模拟结果评估、分布及演变特征、与气象条件的关系等方面分析了 PM_{2.5} 的模拟特征。模拟研究表明, 山东 PM_{2.5} 积聚期间多为弱的偏南风控制, 消散阶段受西北风控制, 当北京—天津—河北 (京津冀) 一带同时存在更为严重的 PM_{2.5} 污染时, 西北冷空气的平流输送使得山东部分地区的 PM_{2.5} 浓度在完全削弱前又出现了一个高峰值。污染期间山东全省平均 PM_{2.5} 的模拟浓度为 125 $\mu\text{g m}^{-3}$, 伴随着地面 3.0 m/s 的低风速、370 m 低边界层高度和 70% 左右的相对湿度, 其中 PM_{2.5} 的模拟值受边界层高度的影响最大。整个污染期间全省平均 PM_{2.5} 模拟值高于监测值 10% 左右, 但是对于局部站点 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ 及以上的观测峰值, 模式模拟结果明显偏低。模拟效果的评估结果是: 山东南部最好、然后是山东半岛, 山东中部、西北部地区较差。

关键词 山东 霾 细颗粒物 (PM_{2.5}) WRF/Chem 模式 气象条件

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0313-10

中图分类号 X16

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15187

A Modeling Study on Characteristics of a PM_{2.5} Pollution Process in Shandong Province

LI Tian¹, WANG Hong^{2,1}, ZHAO Tianliang¹, WANG Yaqiang², TAN Chenghao¹,
and ZHANG Lei¹

¹ Key Laboratory for Aerosol and Cloud Precipitation of China Meteorological Administration/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract In this study, the Weather Research and Forecasting/Chemistry (WRF/Chem) model is applied to simulate a PM_{2.5} pollution process occurred in Shandong Province during 21–26 February 2014. With a focus on analysis and evaluation of simulation results and temporal and spatial variations of PM_{2.5} concentration, the authors explore the characteristics of PM_{2.5} in Shandong Province. The relationship between the pollution process and meteorological conditions is also investigated. The results indicate that weak southerly winds were prevailing during the period of PM_{2.5} accumulation, while the northwesterly winds were dominant during the process of PM_{2.5} dissipation. In addition, when severe pollution occurred over the Beijing–Tianjin–Hebei region, the northwesterly transported pollutants to Shandong,

收稿日期 2015-08-12; 网络预出版日期 2016-01-09

作者简介 李恬, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境数值模拟。E-mail: njlitian@126.com

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441201, 国家自然科学基金 41275007, 国家科技支撑计划项目 S2014BAC22B04

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2014CB441201), National Natural Scientific Foundation of China (Grant 41275007), National Key Technology Support Program (S2014BAC22B04)

leading to a second high peak of PM_{2.5} concentration over some areas in Shandong before the PM_{2.5} dissipation. During the 6-day period of pollution, the average value of simulated PM_{2.5} concentration is $125 \mu\text{g m}^{-3}$, the mean surface wind speed is 3.0 m/s, the boundary layer height is 370 m and the mean relative humidity is 70%, respectively. The results also indicate that the simulated PM_{2.5} concentration is strongly dependent on the boundary layer height. The regionally averaged PM_{2.5} concentration in Shandong Province is overestimated by about 10% in the model simulation, whereas the high values of observed PM_{2.5} (e.g. greater than $300 \mu\text{g m}^{-3}$) at several stations are obviously underestimated in the model result. The model performs best in southern Shandong, followed the Shandong Peninsula. The model performance is less satisfactory in the middle and southwestern regions of Shandong.

Keywords Shandong, Haze, PM_{2.5}, WRF/Chem model, Meteorological condition

1 引言

20 世纪 90 年代以来, 人为排放的大气气溶胶显著增加导致我国中东部地区的污染天气频发, 大气环境问题堪忧(张小曳等, 2013)。频发的“霾现象”愈发受到关注。由于空气质量数值模式的兴起, 近年来对污染事件的关注点也不仅仅局限于霾日的气候统计分析、区域时空变化及气象环流分析及气溶胶成分的来源解析(赵普生等, 2012; Zhang et al., 2012; 宋连春等, 2013; 王跃等, 2014), 越来越多的研究侧重于应用不同的空气质量化学模式分析我国污染过程的生消机理, 大气污染物的水平、垂直分布特征及污染物的区域输送规律等等(陈训来等, 2007; 何晖等, 2009; 王丽涛等, 2012; 高怡和张美根, 2014; 王自发等, 2014)。数值模式已经成为污染天气预报、预测的一个重要工具。

细颗粒物(PM_{2.5})是霾天气过程中的主要污染物, 有关其在霾过程中的相关模拟研究也取得了一系列的进展: 王自发等(2014)通过模拟 2013 年 1 月中国中东部持续的霾天气, 发现静稳天气下北京—天津—河北(京津冀)地区仍然存在显著的区域输送, 并得到京津冀区域外与区域内 PM_{2.5} 输送之和与局地源贡献相当的结论。王哲等(2014)利用新建立的双向耦合模式 WRF-NAQPMS (Weather Research and Forecasting-Nested Air Quality Prediction Modeling System) 研究了气溶胶反馈机制在重度霾过程中对 PM_{2.5} 及气象要素模拟的影响。薛文博等(2014)基于 CAMx (Comprehensive Air quality Model with Extensions) 空气质量模式的颗粒物来源追踪技术定量模拟了全国 PM_{2.5} 及其化学组分的跨区域输送规律, 建立了全国 31 个省市(源)向 333 个地级城市(受体)的 PM_{2.5} 及其化学组分传输矩阵。此外, 李锋等

(2015) 和 Jiang et al. (2015) 也分别利用 WRF-CMAQ (Community Multi-Scale Air Quality) 模式和 GRAPES_CUACE (Global/ Regional Assimilation and Prediction System/Chinese Unified Atmospheric Chemistry Environment) 模式计算了外来源和本地源对珠江三角洲地区和京津冀地区霾过程中 PM_{2.5} 的贡献。王茜等(2015)利用 CMAQ 空气质量模式对上海市 10 个国控站点的 PM_{2.5} 浓度进行预报并进行了检验评估。Tie et al. (2015) 通过对北京霾的形成过程进行模拟发现, 北京西北部的高压对 PM_{2.5} 的清除起到重要作用, 但当北京处于东南部的低压与西北侧的高压之间时, 反而有助于霾过程中 PM_{2.5} 浓度累积。Wang et al. (2015a, 2015b) 的研究结果表明, 霾现象发生时大气边界层高度与地面 PM_{2.5} 的浓度呈反相位变化, 气溶胶的直接效应使边界层低层减温、高层增温, 从而大气层结更稳定, 进而使得边界层的高度更低、边界层内的湍流扰动更弱, 这造成对 PM_{2.5} 浓度聚积的正反馈; 同时, 边界层内气溶胶浓度增加产生的直接辐射强迫作用(边界层内风速的增加, 副高的削弱), 又对霾的维持起到负反馈作用。

作为东部沿海的经济、人口大省, 山东省北临京津冀, 南望长三角地区, 重要的地理位置也使得其成为中东部霾研究中不可缺少的地区(韩宵和张美根, 2014)。随着工业的发展, 山东地区的霾事件也逐年增加(王业宏等, 2009; 李恬等, 2014), 尤其是近几年的空气污染情况也不容乐观(高会旺等, 2014; Wang et al., 2014)。然而, 对于空气污染频繁发生的山东地区而言, 霾现象尤其是其数值模拟的研究相对较少, 很多问题还亟待解决。因此, 本文的研究利用空气质量模式 Weather Research and Forecasting/Chemistry (WRF/Chem), 模拟山东地区 2014 年 2 月一次霾过程中 PM_{2.5} 的分布情况及浓度特征, 一方面为 WRF/Chem 模式模拟山东

PM_{2.5} 的浓度及演变结果作简要评估, 并指出模拟中存在的问题, 为 PM_{2.5} 的预报提供指示作用; 另一方面也为了利用模式模拟结果研究污染过程中 PM_{2.5} 的分布、演变规律及其与主要气象因素的关系。

2 资料与方法

2.1 模拟区域、时间及参数设置

利用新一代在线空气质量模型 WRF/Chem V3.5, 采用 Lambert 投影方式, 应用双重双向嵌套网格进行模拟, 第一层区域 D01 分辨率为 27 km, 包含大部分中国地区及其周边国家地区, 第二层区域 D02 分辨率为 9 km, 考虑到区域之间污染的联动影响效应, 范围覆盖包括山东全省及其周围的部分省市。两层网格均设置有相同的物理化学参数。图 1 及表 1 给出了模式模拟区域范围及相关参数设置。为了确保模式对于类似污染天气模拟的广泛性和加强对模拟结果的验证, 模拟时间为 2014 年 1 月 28 日 00:00 (世界协调时, 下同) 至 2 月 28 日 00:00, 并将模拟结果中 2 月 20~27 日时段进行研究讨论。

表 1 模拟参数配置

Table 1 The model configuration

模式选项	参数配置
短波辐射方案	Goddard 方案
长波辐射方案	RRTM 方案
微物理方案	Lin 方案
积云参数化方案	New Grell 方案
边界层方案	YSU 方案
化学机制	CBMZ 方案
光解选项	Fast-J 选项
气溶胶化学	MADE/SORGAM 方案
垂直层	35 层 (顶层 5000 Pa)

2.2 初始场、排放源、气象要素及 PM_{2.5} 观测数据

气象初始场来自于 NCEP 再分析数据, 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 1° (纬度) × 1° (经度)。排放源清单来自于“中国多尺度排放源清单模型” (<http://www.meicmodel.org>[2015-01-01])2010 年的排放源清单, 其中包含电力、工业、民用、交通和农业五大类人为排放源, 涵盖 10 种主要大气污染物和温室气体 (SO₂、NO_x、CO、NMVOC、NH₃、PM_{2.5}、CO₂、PM₁₀、BC 和 OC) 等, 空间分辨率为 0.25° (纬度) × 0.25° (经度)。其中, 2 月的日均 PM_{2.5} 浓度的源清单分布详见图 1。将来自于山

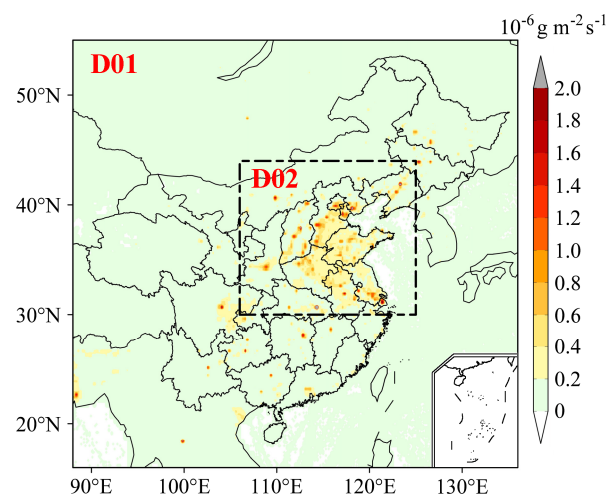


图 1 双重嵌套模拟区域及 2014 年 2 月 PM_{2.5} 的源分布

Fig. 1 The double-nesting model domains and the primary sources of PM_{2.5} emission in Feb 2014

东省自动气象观测站逐时的风速、气温和相对湿度等气象要素观测资料和来自于中国环境监测总站的 PM_{2.5} 浓度逐小时监测数据用于模拟结果的对比, 并将所有数据的北京时转换为世界时。图 2 展示了本研究用到的山东 28 个气象要素与 PM_{2.5} 数据的观测站点分布。为了更好地总结区域模拟结果, 本文按照气象预报上的区域规定, 将站点划分为山东西北部 (鲁西北)、中部 (鲁中)、南部 (鲁南) 和山东半岛地区。

2.3 模式评估方法

本文选择平均偏差 (mean bias, MB), 标准化平均偏差 (normalized mean bias, NMB), 标准化平均误差 (normalized mean error, NME) 和均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 等 4 种统计方法评估模拟结果与实际观测的吻合程度。MB 表示各模拟值与观测值的平均偏离值, NMB 表示各模拟值与观测值的平均偏离程度, NME 表示各模拟值与观测值的平均绝对误差, RMSE 用来衡量模拟值与观测值的偏离程度。NMB 和 NME 是无量纲量, MB 和 RMSE 是有量纲量, 它们均越接近 0, 表示模拟效果越理想。

3 结果分析与讨论

3.1 气象要素模拟与评估

气象要素如风场和温度场对于污染物的形成与演变起到重要作用, 为了验证模式的可靠性, 首

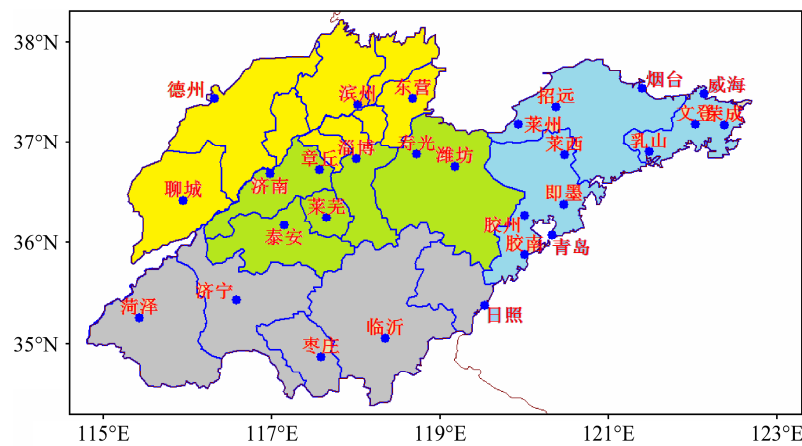


图2 28个气象要素及PM2.5观测站点分布(黄色:鲁西北;绿色:鲁中;灰色:鲁南;蓝色:半岛地区)

Fig. 2 Distribution of observation sites for meteorological elements and PM2.5 measurements over Shandong Province (yellow–Northwestern Shandong, green–central Shandong, grey–southern Shandong, and blue–peninsula)

先对气象场要素的模拟值与观测值进行对比。图3为整个2月风速、温度和相对湿度的模拟值与观测值的时间序列变化。表2列出了污染期间(2月21~26日)模拟的各指标评估值。本文首先对不同站点的风速、相对湿度和温度模拟与观测进行比较,发现各站的模拟值与观测值并无太大差异,且气象要素的变化趋势均类似,于是将相同时刻的全省28个站点的模拟值与观测值分别做均值比较,这种方法可以反映区域整体的模拟情况(Hu et al., 2010)。通过对风向的比较发现,污染期间各站风向大多为偏南风(风向为 $90^{\circ}\sim 270^{\circ}$),与观测结果相符,但是由于对风向做算术平均值的做法存在较大误差,此处省略风向的时间序列图。从图3可见,WRF-Chem模式可以较好地模拟出各要素值的变化特征,但同时也存在一定的模拟误差(表2),如风速模拟值整体偏高、相对湿度极大值模拟偏高等,这可能是由于辐射、下垫面和内网格9 km的分辨率无法十分准确地模拟局地气象场的原因造成的。

表2 污染过程中各气象要素模拟结果的统计指标对比

Table 2 Statistics between observations and simulations of meteorological elements during the pollution period

	MB	NMB	NME	RMSE	模拟平 均值	观测平 均值
风速	0.81 m/s	44.4%	67.3%	0.89 m/s	3.1 m/s	2.3 m/s
相对湿度	7.75%	11.7%	19.6%	16.5%	73.5%	66.8%
温度	-0.72 $^{\circ}\text{C}$	-11.1%	29.8%	2.4 $^{\circ}\text{C}$	5.8 $^{\circ}\text{C}$	6.5 $^{\circ}\text{C}$

3.2 各站及不同区域PM2.5模拟结果评估

从山东28个站点中选取具有代表性的12个站

点(其中济南、淄博代表中部地区,枣庄、临沂代表东南部,菏泽、济宁表示西南部,聊城、德州表示西北部,滨州、东营代表北部地区,青岛、烟台代表半岛地区),比较PM2.5浓度的模拟值与监测值的时间序列变化(图4),时间分辨率为1 h,时间长度为2014年整个2月共672 h。由图4可以看到,对于整个2月而言,WRF-Chem模式可以较为准确地模拟出山东各站PM2.5浓度的日变化趋势。从监测曲线来看,2月总共有3个PM2.5污染较为严重的时期,分别发生在月初、月中、月末。通过观察观测与模拟两条曲线的吻合程度可以发现,各站点对于第三次的模拟结果最为吻合,这次污染的发生时间为21~26日,各站点在污染期间的平均PM2.5浓度监测值为 $100\sim 200\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$,并对比6日期间各站空气质量指数(air quality index, AQI)小时数据的平均值(图略),发现德州、东营(鲁西北地区)等地达到200以上,枣庄、菏泽(鲁南)及济南、潍坊(鲁中)等地AQI的6 d平均值在150~200范围内,半岛地区的AQI也均在100以上,山东大部地区属于中度污染水平。

在WRF-Chem可以较好地模拟出21~26日污染过程中PM2.5浓度演变趋势的前提下,利用不同统计指标对山东省的模拟结果做了评估(表3),可以看到,模拟值均在可接受的误差范围内(王茜等, 2015)。就全省28个站点整体而言,模拟值与监测值较为接近,MB为 $10.51\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$,整体存在9.25%的高估情况,这可能与山东地区排放源清单的不确定性或气象场的误差有关,但模式是否对于山东地

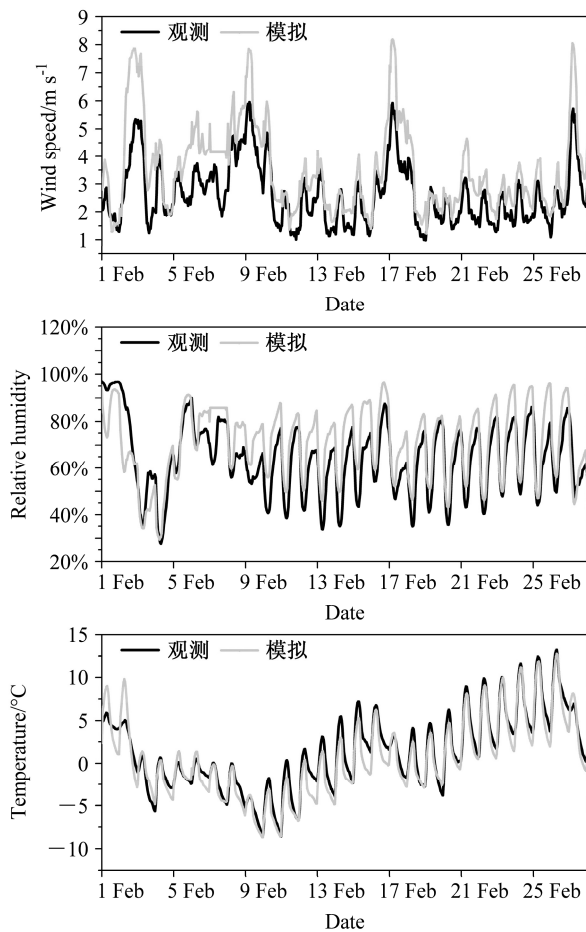


图3 山东省28站平均风速、平均相对湿度、平均温度模拟值与监测值的时间序列对比

Fig. 3 Time series of observed and simulated hourly wind speed, relative humidity, and temperature averaged over the 28 sites in Shandong Province in Feb 2014

区 PM_{2.5} 浓度的污染模拟均具有系统性的高估现象以及详细的原因,则需要更多的个例进一步模拟验证。对于全省4个地区而言,除了鲁西北模拟值存在低估现象(−8.02%)以外,鲁中、鲁南及半岛地区皆有10%左右略微高估现象,但需要指出的是,由图4可以看出,鲁西北的德州、聊城站相比其他区域的站点在这次污染过程中受影响最大,PM_{2.5} 浓度最高均达到 300 $\mu\text{g m}^{-3}$,而模式对于这些浓度高值的模拟能力不足,很有可能导致鲁西北地区总体模拟效果偏低。就 MB、NMB、NME、RMSE 四个指标综合来看,鲁南各站点的 PM_{2.5} 浓度的模拟效果最好,其各项指数均最小,标准化平均偏差仅为 5.31%,其次是半岛地区、鲁中地区,而对于鲁中的部分站点如济南、淄博(见图4),300 $\mu\text{g m}^{-3}$ 的高值也没有模拟出来,模拟效果相对最差

的是鲁西北地区各站。应当指出,由于 PM_{2.5} 监测资料所限,每个地区的样本个数较少也会使得指标的计算产生误差。

表3 污染过程中各区域 PM_{2.5} 浓度小时模拟结果的统计指标对比

Table 3 Statistics of hourly observations and simulations of PM_{2.5} concentrations during the pollution period

	MB/ $\mu\text{g m}^{-3}$	NMB	NME	RMSE/ $\mu\text{g m}^{-3}$	模拟平均 值/ $\mu\text{g m}^{-3}$	观测平均 值/ $\mu\text{g m}^{-3}$
全省	10.51	9.25%	31.68%	47.19	125.4	116.6
鲁西北	−13.06	−8.02%	28.16%	58.60	149.7	162.7
鲁中	11.45	10.31%	34.92%	51.59	122.6	111.1
鲁南	5.9	5.31%	28.16%	40.51	117.8	111.8
半岛	11.09	10.31%	29.84%	40.51	118.7	107.6

3.3 地面 PM_{2.5} 浓度、风场与气压场的演变

图5给出了污染过程中山东及其周边地区近地面 PM_{2.5} 浓度与风速的模拟值及地面气压(FNL 资料获得)的演变情况。污染过程前期(21日00:00),山东地区主要受一弱高压控制,高压内的弱风速为 PM_{2.5} 的聚积提供了有利的条件,山东西南部与河北南部交界延伸至河南北部一带是一个 PM_{2.5} 污染高值区;至21日00:00,山东地区处于地面高压西北侧边缘,中东部地区为弱南风气流,半岛地区为弱的西南风气流,有利于将河南、安徽一带的 PM_{2.5} 输送至此,鲁西南的 PM_{2.5} 聚积尤为严重。污染过程中期(24日00:00),山东处于中心位于海上的弱高压边缘,等压线稀疏,弱风速使得污染物不易扩散,除半岛南部地区,山东大部地区 PM_{2.5} 浓度瞬时值均达到 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以上;西侧京津冀一带存在更严重的污染,PM_{2.5} 浓度更是达到了 350 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以上,风速基本保持静风。污染过程后期,26日00:00起,山东大部地区 PM_{2.5} 污染开始消散,中南部降到 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下;一强冷高压控制河北西北部,密集的等压线使得西北风速加大,26日18:00至27日00:00,强冷空气持续从西北方向来袭,干冷的西北风将京津冀地区 PM_{2.5} 向东南方输送至山东地区,使得山东大部又经历了一次 PM_{2.5} 的“回潮”。值得一提的是,回到图4的观测结果上看,山东北部地区(滨州、东营)、半岛地区(青岛)确实存在此现象,即27日左右突然经历一次 PM_{2.5} 的高峰值,但是模式对鲁中南地区站点的模拟结果却存在“虚报”高峰值的现象,这可能是由于 PM_{2.5} 在传输过程中被清除了(气溶胶干沉降等作用)。地面风速仅是影响近地面 PM_{2.5} 传输及浓

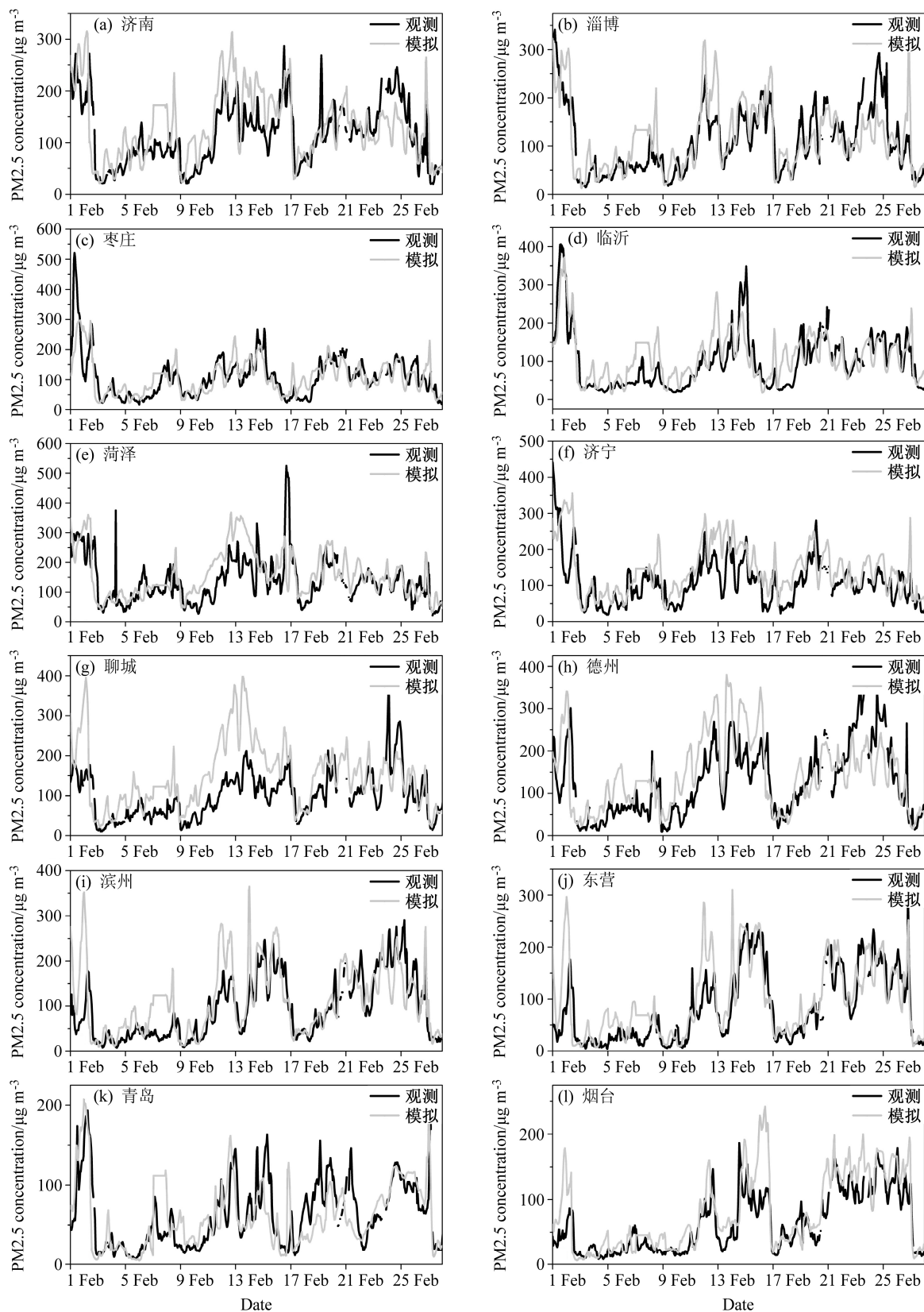


图4 山东省不同站 PM2.5 浓度模拟值与监测值时间序列对比

Fig. 4 Time series of observed and simulated hourly PM2.5 concentrations at different sites in Shandong in Feb 2014

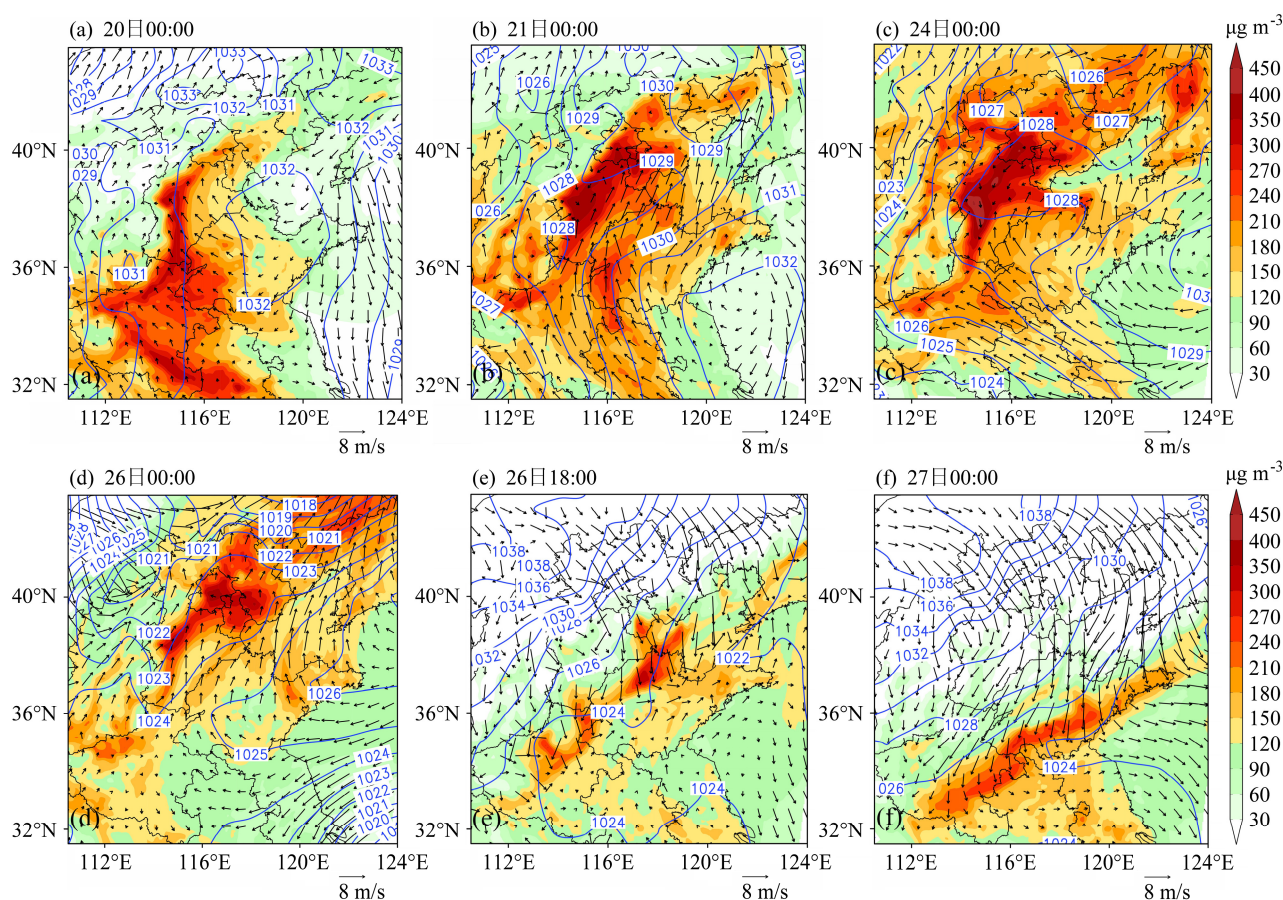


图5 模拟的近地面 PM_{2.5} 浓度 (阴影)、风场 (箭头, 单位: m/s) 及海平面气压 (等值线, 单位: hPa) 的演变

Fig. 5 Simulated variations of surface PM_{2.5} concentrations (shadings), wind field (vectors, units: m/s), and sea level pressure (isolines, units: hPa)

度变化的因素之一, 有关山东地区污染物输送和本地源对污染物的相对贡献需要更为详细的模拟和评估。

3.4 影响 PM_{2.5} 的气象因素模拟值分析

气象因素对 PM_{2.5} 污染的演变起到了至关重要的作用, 上述概括了地面 PM_{2.5} 浓度与天气系统的演变, 图 6 则说明了污染过程中地面 PM_{2.5} 浓度与主要气象要素演变的相关关系。图中 PM_{2.5}、边界层高度、风速、相对湿度的日平均值均是全省 28 个站点的平均值。可以从图中得到, PM_{2.5} 浓度的 8 d 变化情况基本与边界层高度、风速呈反相关关系, 与相对湿度呈正相关关系。其中, 22~24 日, PM_{2.5} 浓度从 103.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ 升至 142.2 $\mu\text{g m}^{-3}$, PBLH 从 383 m 降至 345 m, 风速从 3.3 m/s 降至 2.7 m/s, 相对湿度从 68.2% 上升至 74.4%; 24~27 日, PM_{2.5} 浓度从 142.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 降到 48.8 $\mu\text{g m}^{-3}$, PBLH 从 345 m 升至 580 m, 风速从 2.7 m/s 升至 5.5 m/s, 相对湿度从 74.4% 降至 57.6%。尤其是 26~27 日污染消

散阶段, PM_{2.5} 浓度骤降 79 $\mu\text{g m}^{-3}$, PBLH 升高了 210 m, 风速升高 2.4 m/s, 相对湿度下降 17%。综上所述, 21~26 日污染期间平均 PM_{2.5} 浓度为 125 $\mu\text{g m}^{-3}$, 伴随着平均 3.0 m/s 的低风速、370 m 低边界层高度和 70% 左右的相对湿度。

为了进一步说明模拟的 PM_{2.5} 浓度与以上气象要素的变化相关性, 将污染 6 d 的每日 24 h 模拟值分别取过程平均, 再求得 28 站的区域平均, 即得到的 24 个时间与空间的平均值。一日 24 h 中 PM_{2.5} 的浓度与 PBLH、风速和相对湿度的散点分布如图 7 所示, 由图可以看到, 白天 PM_{2.5} 浓度的模拟值的主要变化幅度在 85~130 $\mu\text{g m}^{-3}$ 之间, 较夜间变化幅度 (115~135 $\mu\text{g m}^{-3}$ 之间) 更分散, 且整体白天模拟值低于夜间。各气象要素 PBLH、风速和相对湿度的白天模拟值也较夜晚模拟值的变化幅度更大, 污染期间白天 PBLH 的变化范围为 250~1000 m, 风速为 3.0~4.4 m/s, 相对湿度为 45%~70%; 而污染夜间, PBLH 的波动范围为 175~250 m, 风

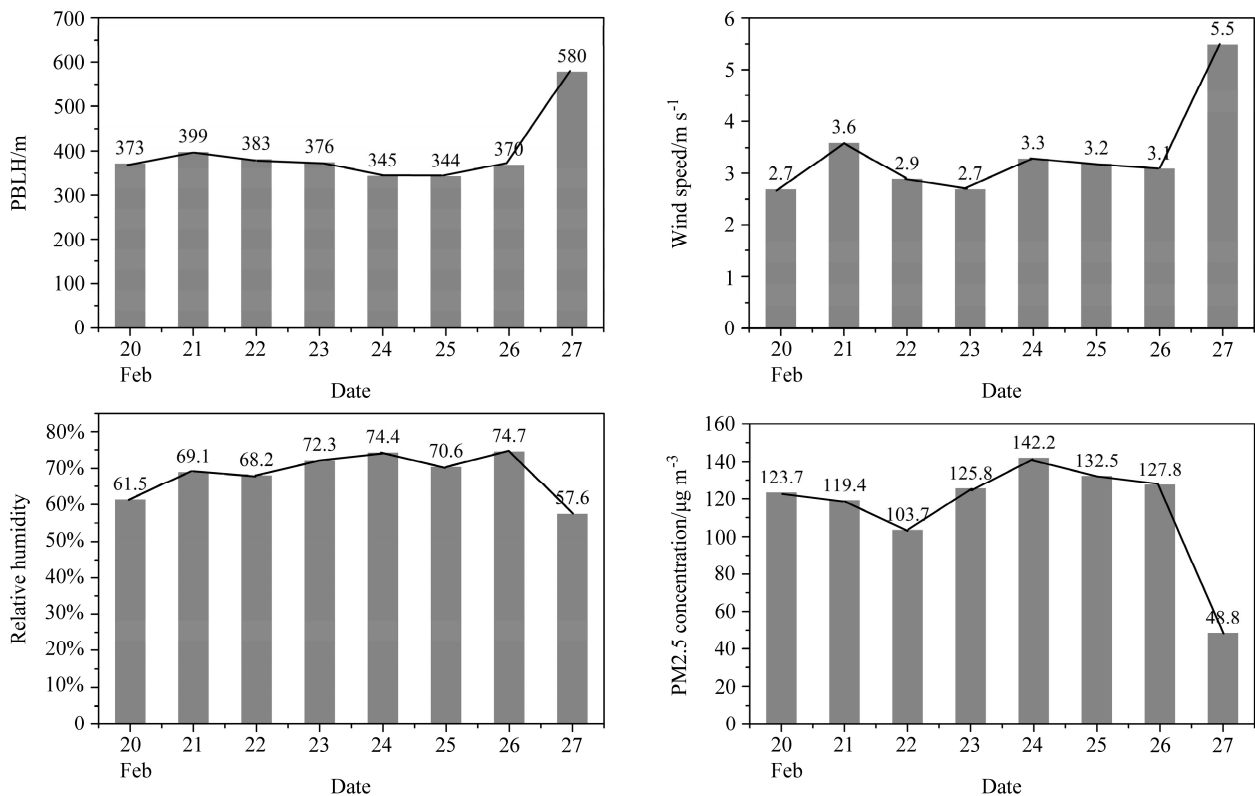


图6 模拟的山东地区污染过程边界层高度、风速、相对湿度及PM2.5浓度日均值的变化

Fig. 6 Variations of daily mean simulated planetary boundary layer height (PBLH), wind speed, relative humidity, and PM2.5 concentrations during the pollution period in Shandong

速的波动范围仅为 2.7~3.0 m/s, 相对湿度的波动范围为 70%~90%。且 PBLH 和风速的白天模拟值高于夜间, 相对湿度的白天模拟值低于夜间, 这是符合常理的。由此可见, 对于气象要素变化剧烈的污染时期, 对白天时段的 PM2.5 浓度进行模拟更为重要。通过相关性计算发现, PM2.5 与 PBLH、风速和相对湿度的相关系数分别为 -0.94、-0.86 和 0.93(均通过显著性为 0.001 的 t 检验), 因此, PM2.5 浓度的模拟值受 PBLH 的影响会更大一些。从日出开始, 随着太阳辐射的加强, 边界层内的湍流扩散随之增强, PBLH 随之增大, 至 15:00 左右达到最大, 之后随着太阳辐射的减弱, PBLH 也随之减小, 夜晚维持稳定, 于是这就可以解释为什么白天 PM2.5 浓度的模拟值偏低了。模式对这种白天的逐时变化和日夜变化程度的描述是影响白天 PM2.5 浓度逐时变化和日夜差异的重要因素, 因而也可能是导致白天 PM2.5 浓度的模拟偏差的最重要原因之一, 这也是数值模式提高 PM2.5 模拟和预报精度的亟待改进之处。

4 结论

本文利用 WRF-Chem 空气质量模式模拟了山东地区一次中度 PM2.5 污染过程, 并主要从时空演变、气象要素特点等角度入手分析了此次 PM2.5 污染特征, 得到以下结论:

WRF-Chem 能够合理地模拟出山东地区灰霾过程中 PM2.5 的浓度时空变化。在污染期间, 模式对于全省平均 PM2.5 浓度的模拟值高出实际监测值 10% 左右, 但却无法模拟出鲁西北、鲁中个别站 PM2.5 达 $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 左右的浓度峰值, 这是模式在峰值模拟中所存在的重要问题。根据 MB、NMB、NME、RMSE 等指标来看, 鲁南地区各站点的模拟效果最好, 鲁西北地区相对最差。

山东地区 PM2.5 聚积时受高压边缘控制, 近地面大多为偏南风向, 当此时京津冀地区也存在更为严重的污染现象时, 西北冷空气吹来有利于 PM2.5 的消散, 山东部分地区污染消散前出现由一个京津

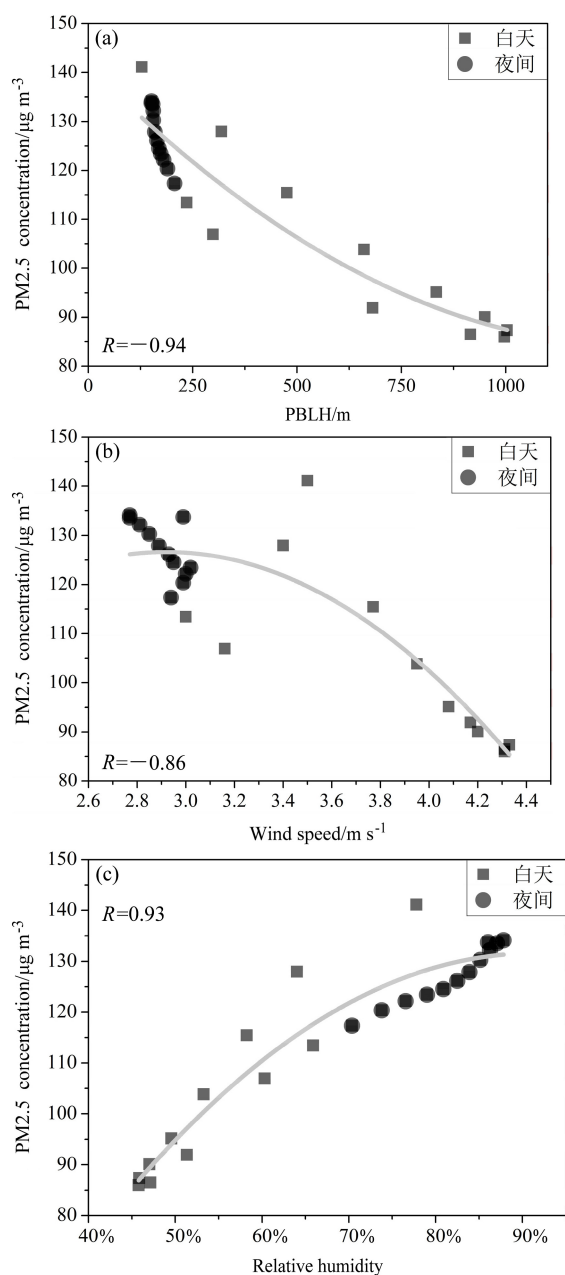


图7 模拟的山东污染过程中日边界层高度、风速、相对湿度与PM_{2.5}浓度的关系

Fig. 7 The relationship between simulated PBLH, wind speed, relative humidity and PM_{2.5} concentrations during the pollution period in Shandong

冀地区带来的PM_{2.5}高峰值。通过分析气象要素对于PM_{2.5}的模拟影响,污染期间山东地区平均PM_{2.5}浓度为 $125 \mu\text{g m}^{-3}$,伴随着平均 3.0 m/s 的低风速、 370 m 低边界层高度和70%左右的相对湿度,其中PM_{2.5}浓度受边界层高度的影响最为敏感,白天各气象要素及PM_{2.5}浓度模拟值的波动幅度较夜晚大。

参考文献 (References)

- 陈训来, 冯业荣, 王安宇, 等. 2007. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 46 (4): 103–107.
- Chen Xunlai, Feng Yerong, Wang Anyu, et al. 2007. Numerical experiment research on air pollutants during atmospheric haze over the multi-cities of Pearl River Delta region [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 46 (4): 103–107, doi:10.3321/j.issn:0529-6579.2007.04.023.
- 高会旺, 陈金玲, 陈静. 2014. 中国城市空气污染指数的区域分布特征 [J]. 中国海洋大学学报, 44 (10): 25–34. Gao Huiwang, Chen Jinling, Chen Jing. 2014. Regional distributions of air pollution index in major cities of China [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 44 (10): 25–34.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 140–152. Gao Yi, Zhang Meigen. 2014. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 140–152, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13135.
- 韩霄, 张美根. 2014. 2013年1月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 127–139. Han Xiao, Zhang Meigen. 2014. Model analysis of haze formation over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 127–139, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13136.
- 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174–1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1174–1186, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.05.
- Hu X M, Nielsen-Gammon J W, Zhang F Q. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49 (9): 1831–1844, doi:10.1175/2010JAMC2432.1.
- Jiang C, Wang H, Zhao T L, et al. 2015. Modeling study of PM_{2.5} pollutant transport across cities in China's Jing-Jin-Ji region during a severe haze episode in December 2013 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15: 5803–5814, doi:10.5194/acp-15-5803-2015.
- 李锋, 朱彬, 安俊岭, 等. 2015. 2013年12月初长江三角洲及周边地区重霾污染的数值模拟 [J]. 中国环境科学, 35 (7): 1965–1974. Li Feng, Zhu Bin, An Junling, et al. 2015. Modeling study of a severe haze episode occurred over the Yangtze River Delta and its surrounding regions during early December, 2013 [J]. China Environmental Science (in Chinese), 35 (7): 1965–1974, doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2015.07.008.
- 李恬, 赵天良, 杨晓霞, 等. 2014. 近53年山东省霾季节性特征的年代际变异 [J]. 生态环境学报, 23 (9): 1432–1437. Li Tian, Zhao Tianliang, Yang Xiaoxia, et al. 2014. Inter-decadal variations in the seasonality of haze over Shandong Province in recent 53 years [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 23 (9): 1432–1437, doi:10.3969/

- j.issn.1674-5906.2014.09.004.
- 宋连春, 高荣, 李莹, 等. 2013. 1961~2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析 [J]. 气候变化研究进展, 9 (5): 313-318. Song Lianchun, GaoRong, Li Ying, et al. 2013. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961-2012 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9 (5): 313-318, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.05.001.
- Tie X X, Zhang Q, He H, et al. 2015. A budget analysis of the formation of haze in Beijing [J]. Atmos. Environ., 100: 25-36, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.038.
- Wang H, Shi G Y, Zhang X Y, et al. 2015a. Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region—Part 2: Aerosols' radiative feedback effects [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15 (6): 3277-3287, doi:10.5194/acp-15-3277-2015.
- Wang H, Xue M, Zhang X Y, et al. 2015b. Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region—Part 1: Aerosol distributions and meteorological features [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15 (6): 3257-3275, doi:10.5194/acp-15-3257-2015.
- 王丽涛, 潘雪梅, 郑佳, 等. 2012. 河北及周边地区霾污染特征的模拟研究 [J]. 环境科学学报, 32 (4): 925-931. Wang Litao, Pan Xuemei, Zheng Jia, et al. 2012. A modeling study of the regional haze over Hebei and surrounding areas [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32 (4): 925-931.
- 王茜, 吴剑斌, 林燕芬. 2015. CMAQ 模式及其修正技术在上海市 PM2.5 预报中的应用检验 [J]. 环境科学学报, 35 (6): 1651-1656. Wang Qian, Wu Jianbin, Lin Yanfen. 2015. Implementation of a dynamic linear regression method on the CMAQ forecast of PM2.5 in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 35 (6): 1651-1656.
- Wang X F, Chen J M, Sun J F, et al. 2014. Severe haze episodes and seriously polluted fog water in Jinan, China [J]. Science of the Total Environment, 493: 133-137, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.135.
- 王业宏, 盛春岩, 杨晓霞, 等. 2009. 山东省霾日时空变化特征及其与气候要素的关系 [J]. 气候变化研究进展, 5 (1): 24-28. Wang Yehong, Sheng Chunyan, Yang Xiaoxia, et al. 2009. Spatial-temporal variations of hazes in Shandong Province and its relationship with climate elements [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (1): 24-28, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2009.01.005.
- 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 2014. 北京冬季 PM2.5 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 173-184. Wang Yue, Wang Lili, Zhao Guangna, et al. 2014. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM2.5 heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 173-184, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13178.
- 王哲, 王自发, 李杰, 等. 2014. 气象—化学双向耦合模式(WRF-NAQPMS) 研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 153-163. Wang Zhe, Wang Zifa, Li Jie, et al. 2014. Development of a meteorology-chemistry two-way coupled numerical model (WRF-NAQPMS) and its application in a severe autumn haze simulation over the Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 153-163, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13231.
- 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2014. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策 [J]. 中国科学 (地球科学), 44 (1): 3-14. Wang Zifa, Li Jie, Wang Zhe, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science China (Earth Sciences), 57 (1): 3-13, doi:10.1007/s11430-013-4793-0.
- 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 2014. 中国 PM2.5 跨区域传输特征数值模拟研究 [J]. 中国环境科学, 34 (6): 1361-1368. Xue Wenbo, Fu Fei, Wang Jinnan, et al. 2014. Numerical study on the characteristics of regional transport of PM2.5 in China [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34 (6): 1361-1368.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58 (13): 1178-1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (13): 1178-1187, doi:10.1360/972013-150.
- 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 2012. 京津冀区域霾天气特征 [J]. 中国环境科学, 32 (1): 31-36. Zhao Pusheng, Xu Xiaofeng, Meng Wei, et al. 2012. Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei [J]. China Environmental Science (in Chinese), 32 (1): 31-36, doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2012.01.005.
- 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 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 26571-26615, doi:10.5194/acpd-11-26571-2011.